SÉRIE
DE LA GESTION
DE L'ÉNERGIE

16

À L'INTENTION
DES INDUSTRIES,
COMMERCES
ET INSTITUTIONS

La Régulation automatique

PRÉFACE

L'art et la science de la gestion de l'énergie ont accompli des progrès remarquables au cours de la dernière décennie. La gestion de l'énergie est devenue une discipline sérieuse dans le cadre du processus de gestion de la plupart des entreprises qui connaissent le succès.

D'abord, au début des années 70, on a mis sur pied des programmes d'économie d'énergie afin de réduire la menace de pénurie d'énergie que pesait sur le Canada, de même que la dépendance du pays à l'endroit du pétrole étranger. Toutefois, la hausse vertigineuse des prix n'a pas tardé a donner une signification nouvelle à l'expression «économie d'énergie»: réduire le coût de l'énergie.

Nombre d'industries, de commerces et d'organismes publics ont relevé le défi et abaissé les coûts d'énergie jusque dans une proportion de 50%. On est ainsi arrivé à utiliser l'énergie de façon rationnelle, grâce à des mesures telles que des programmes d'information à l'intention du personnel, des moyens d'entretien plus à point, la simple élimination du gaspillage, et en mettant de l'avant des projets aptes à moderniser ou améliorer les installations et l'équipement.

Pour en arriver maintenant à économiser d'avantage l'énergie, il importe de mieux connaître la technologie et ses applications en plus d'avoir recours à des appareils à haut rendement énergétique.

A la demande du Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, du Programme des groupes de travail sur la gestion de l'énergie dans les secteurs commercial et institutionnel, et d'associations professionnelles et commerciales intéressées, la Division de l'énergie industrielle du ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources a élaboré une série de modules techniques portant sur la gestion de l'énergie.

Ces manuels aideront les gestionnaires et le personnel d'exploitation à découvrir les possibilités de gestion de l'énergie dans leur cadre de travail. On y trouve une quantité de renseignements pratiques, notamment des équations mathématiques, des renseignements généraux sur des techniques éprouvées, ainsi que des exemples concrets d'économie d'énergie.

Pour obtenir de plus amples renseignements concernant les modules figurant dans la liste qui suit ou la documentation utilisée dans le cadre des ateliers, y compris les études de cas, veuillez écrire à l'adresse suivante:

Division de l'énergie industrielle
Direction des économies d'énergie
Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources
580, rue Booth
Ottawa, Ontario
K1A OE4

Gestion de l'énergie et participation des employés
Évaluation de la consommation
Analyse financière énergétique
Compatibilité de la gestion énergétique
Récupération de la chaleur perdue
Isolation thermique des équipements
Éclairage
Électricité
Moteurs électriques économiseurs d'énergie
Combustion
Appareillage de chaufferie
Fours, sécheurs et fours de cuisson
Systèmes à vapeur et à condensat
Chauffage et refroidissement énergétique (Vapeur et eau)
Conditionnement de l'air
Refroidissement et pompes à chaleur
Systèmes de distribution d'eau et d'air comprimé
Ventilateurs et pompes
Compresseurs et turbines
Mesures et contrôles
Régulation automatique
Manutention des matériaux et transport sur place
Point de vue architectural
Accumulation thermique

Ministre des Approvisionnements
et Services Canada 1985
No. de cat. M91-6/16F
ISBN 0-662-93338-9

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
NOTIONS DE BASE	3
Avantages	3
Notions de base	3
Terminologie des processus	3
Mesure	4
Régulation manuelle	4
Régulation automatique	5
Régulation par tout ou rien	7
Régulation proportionnelle	9
Concept	9
Systèmes de signalisation	9
Régulateurs autonomes	10
Régulateurs à mesure directe	10
Régulation proportionnelle	13
Régulation intégrale	15
Action proportionnelle et intégrale	16
Régulation dérivée	16
Action proportionnelle, intégrale et dérivée (P.I.D.)	17
Eléments de réglage final	18
Fonction	18
Positionneurs	18
Capacité des vannes de régulation	18
Caratéristiques de vannes	20
Sécurité intrinsèque	20
Améliorations du système de régulation	20
Régulation par anticipation	21
Régulation en cascade	22
Importance de la connaissance du processus	22
Analyse énergétique	23
Analyse au passage	23
Analyse de diagnostic	23
Sommaire	23

APPAREILLAGE 25

Appareillage de mesure 25

Régulateurs 25
Ordinateurs 27
Composants logiques 29
Régulateurs programmables 31
Générateurs de fonctions et dispositifs de calculs 33

Blocs d'alimentation 34

Panneaux de commande 35

Éléments de réglage final 35
Vannes de régulation 35
Actionneurs de vannes de régulation 37
Positionneurs 37
Accessoires de vanne de régulation 37
Servomoteurs 38
Dispositifs d'entraînement à vitesse variable 38
Alimenteurs automatiques 38
Régulateurs autonomes 39

Systèmes 39
Régulation d'un processus 40
Solutions de régulation 40
Régulation du rapport de débit 42
Régulation par priorité 43
Systèmes de régulation par lots 43

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE 45

Possibilitiés de maintenance 45
Inspection et étalonnage périodiques de l'appareillage de régulation 45
Optimisation des systèmes de régulation 46

Possibilités d'amélioration de coût modique 47
Régulation par tout ou rien 47
Régulation proportionnelle 48
Régulation séquentielle 49

Possibilités de rénovation 50
Régulation analogique 50
Régulateur programmable 50
Ordinateur 51

ANNEXES

A Glossaire
B Conversions courantes
C Liste de contrôle

INTRODUCTION

La régulation automatique est une appellation qui englobe une vaste gamme d'appareillage servant à maintenir des paramètres tels que température, pression et niveau à une valeur prescrite dans toutes les conditions de service. L'usage de la régulation automatique est très répandu dans la plupart des secteurs industriel, commercial et institutionnel. L'objectif du présent module est de montrer comment la régulation automatique peut améliorer le rendement de plusieurs types d'installations tout en économisant de l'énergie.

La régulation automatique procure de nombreux avantages et les raisons motivant son emploi varient d'après les particularités des applications. Les raisons les plus courantes sont les suivantes:

- Certains processus ne pourraient pas être exploités sans une régulation automatique à cause de leur complexité, du nombre de tâches de commande, de la vitesse des variations ou de la difficulté d'interpréter les temps de réponse des appareils de mesure et de déterminer les mesures correctives nécessaires.
- Le gain de précision et d'uniformité qu'assure la régulation automatique permet la fabrication d'un produit de meilleure qualité et diminue le nombre de rejets.
- Le personnel est déchargé de la tâche fastidieuse d'observer le processus à tout moment pour le régler au besoin. Le personnel devient ainsi disponible pour les tâches exigeant réellement une intervention humaine.
- La régulation automatique répond de façon toujours uniforme aux perturbations du processus conformément à la «mise au point» du système. Par opposition, lorsque la régulation dépend des réactions d'un opérateur, le processus est affecté par divers facteurs tels que le degré de vigilance et la motivation de l'opérateur, et le manque d'uniformité dans l'interprétation des signaux à l'intérieur d'un même quart de travail ou lors des changements d'équipes.

Tous les avantages susmentionnés réduisent les coûts d'exploitation d'une entreprise. Les économies ne sont habituellement pas entraînées directement par la régulation automatique, mais plutôt par le rendement amélioré des équipements ou du processus auquel elle est appliquée. Ces économies peuvent se manifester par un coût moindre par unité de production, une diminution des rebuts, un produit de qualité supérieure ou des frais réduits de main-d'oeuvre. Nombre de ces avantages peuvent se traduire directement ou indirectement en économies d'énergie.

Le présent module a été divisé en trois chapitres qui expliquent les principes, les objectifs et les diverses applications de la régulation automatique.

- Le chapitre *Notions de base* explique la terminologie, les modes de régulation et les principes relatifs à la conception des systèmes.
- Le chapitre *Appareillage* décrit les types de systèmes automatiques disponibles sur le marché.
- Le chapitre *Possibilités de gestion de l'énergie* donne divers exemples d'application de la régulation automatique pour économiser de l'énergie et réduire les coûts d'exploitation.
- Les *Annexes* contiennent un glossaire, des tableaux, des tables de conversion et une liste de contrôle facilitant l'évaluation des possibilités de gestion de l'énergie.

NOTIONS DE BASE

Le présent module a pour objet d'expliquer les concepts et les principes de la régulation automatique. Il s'agit d'une étude générale et non mathématique des aspects théoriques et pratiques utiles à connaître de la régulation automatique. Une bonne connaissance des appareils de base étant souhaitable, la lecture du Module 15 — Mesures et contrôles, est un prérequis à la compréhension du présent module.

Avantages

La régulation automatique est couramment appliquée dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel pour les raisons suivantes:

- Le fonctionnement est précis et uniforme, ce qui entraîne un meilleur produit, un meilleur rendement ainsi que moins de rejets et moins de plaintes.
- Le personnel d'exploitation dispose de plus de temps pour surveiller d'autres parties de l'installation et assurer l'entretien des équipements.
- Les coûts d'exploitation sont réduits grâce à l'amélioration du rendement du système et à la fréquence réduite des interventions humaines.

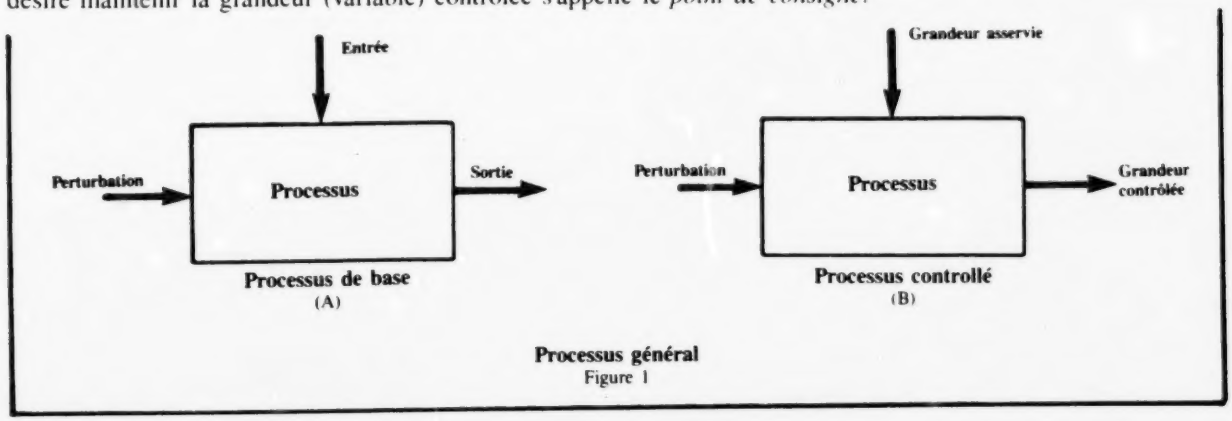
Tous les avantages susmentionnés se traduisent directement ou indirectement par des économies, principalement des économies d'énergie.

Notions de base

Terminologie des processus

La figure 1 présente de façon schématique une description générale d'un processus. Un *processus* désigne une installation ou une activité industrielle où se produit un changement physique ou chimique de la matière ou une conversion d'énergie. Un processus peut donc être le conditionnement de l'air à l'intérieur d'un immeuble, un échangeur de chaleur ou une chaudière.

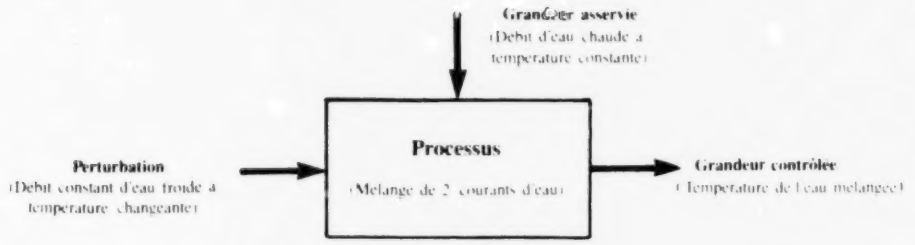
Dans un processus de base (figure 1-A), la matière en transformation est l'*entrée*, et le produit résultant est la *sortie*. Il y a toujours une ou plusieurs *perturbations* qui affectent le fonctionnement du processus. La régulation automatique sous-entend un processus contrôlé (figure 1-B). La sortie du processus, qui représente le produit final désiré selon certaines caractéristiques ou spécifications, est appelée *grandeur (variable) contrôlée*. L'entrée du processus qui doit être modifiée pour satisfaire aux exigences de la grandeur (variable) contrôlée et compenser les perturbations s'appelle la *grandeur (variable) asservie*. Les *perturbations* sont les facteurs intervenant dans le processus qui font s'éloigner la grandeur (variable) contrôlée de sa valeur prescrite. La grandeur (variable) contrôlée doit être maintenue à sa valeur prescrite malgré toutes les perturbations qui surviennent. Cette valeur à laquelle on désire maintenir la grandeur (variable) contrôlée s'appelle le *point de consigne*.



Processus général
Figure 1

Pour mieux expliquer la régulation de processus, prenons un exemple précis (figure 2). Tout en employant les termes généraux, nous allons ajouter des conditions précises pour mieux expliquer la terminologie. Le processus consiste à mélanger deux courants d'eau de température différente pour en obtenir un seul à la température désirée. La perturbation du processus est la variation de température de l'eau froide. Le débit d'eau chaude est donc modifié de façon qu'en se combinant avec de l'eau froide, il porte l'eau mélangée à la température désirée. Ainsi, le débit d'eau chaude est la grandeur (variable) asservie et la température de l'eau mélangée, la grandeur (variable) contrôlée. La température désirée de l'eau mélangée est le point de consigne.

Le processus de la figure 2 ne fait intervenir qu'une seule perturbation. En réalité, outre la température de l'eau froide, il pourrait exister plusieurs perturbations simultanées, par exemple, le débit de l'eau froide, la température de l'eau chaude et le débit de sortie de l'eau mélangée. Il peut être nécessaire d'effectuer certaines vérifications ou certains calculs sur place pour s'assurer que l'équilibre de toutes les conditions demeure constante de sorte que la grandeur contrôlée soit maintenue à l'intérieur de limites satisfaisantes en agissant sur la grandeur asservie. (Se reporter à la section intitulée «Importance de la connaissance du processus» dans le présent chapitre.)



Exemple de régulation de processus
Figure 2

Mesure

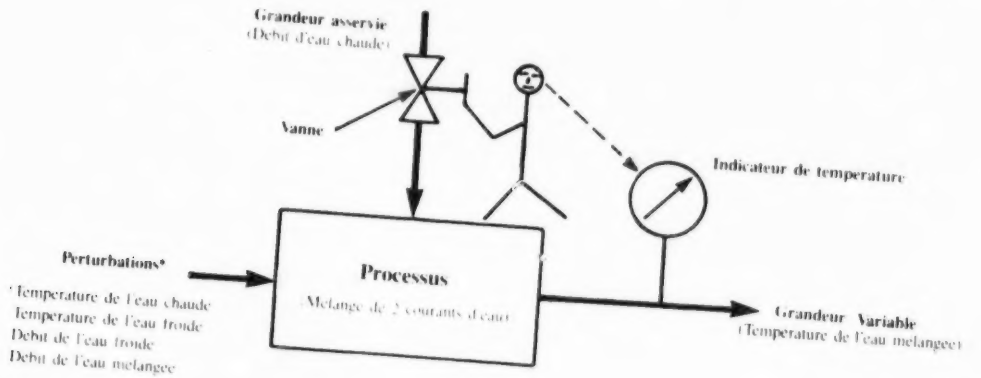
Une mesure de précision est indispensable à la qualité de la régulation d'un processus. L'élément de mesure fait parfois partie intégrante d'un appareil de commande; c'est le cas des régulateurs autonomes et des régulateurs à mesure directe décrits sous la rubrique «Régulation proportionnelle». Cependant, la majorité des appareils de régulation automatique ne mesurent pas directement la grandeur contrôlée. On se sert plutôt d'un transmetteur qui capte la variable de processus et transmet à un régulateur un signal proportionnel à sa valeur. On peut ainsi raccorder des dispositifs tels qu'indicateurs, enregistreurs et totalisateurs de débit au même circuit de sortie du transmetteur que le régulateur. On peut également regrouper plusieurs régulateurs et appareils connexes dans un poste central pour faciliter le contrôle des installations et éviter l'affectation permanente du personnel dans une zone dangereuse.

Régulation manuelle

Pour maintenir la température de l'eau au point de consigne on peut, entre autres, installer un indicateur de température et un robinet (figure 3). L'opérateur observe la température réelle de l'eau et, sachant la température de consigne, modifie le débit d'eau chaude selon les besoins en manoeuvrant le robinet. Quoique cette méthode semble relativement simple, elle exige cependant une attention constante de la part de l'opérateur. Une régulation manuelle peut être insuffisante pour plusieurs raisons.

- Il est parfois impossible de prévoir la présence et l'amplitude des perturbations.
- L'opérateur n'a pas toujours assez de temps pour surveiller adéquatement les perturbations du processus ni pour effectuer les réglages nécessaires (en d'autres termes, le nombre et la nature des grandeurs contrôlées peuvent dépasser les capacités de l'opérateur).
- Des complications, dues par exemple au temps de réponse d'un indicateur, peuvent obliger l'opérateur à retarder les réglages et par conséquent, à trop changer la valeur. Le temps de réponse est le délai qui s'écoule entre le moment où une perturbation se présente et celui où elle se manifeste dans la grandeur controlée.

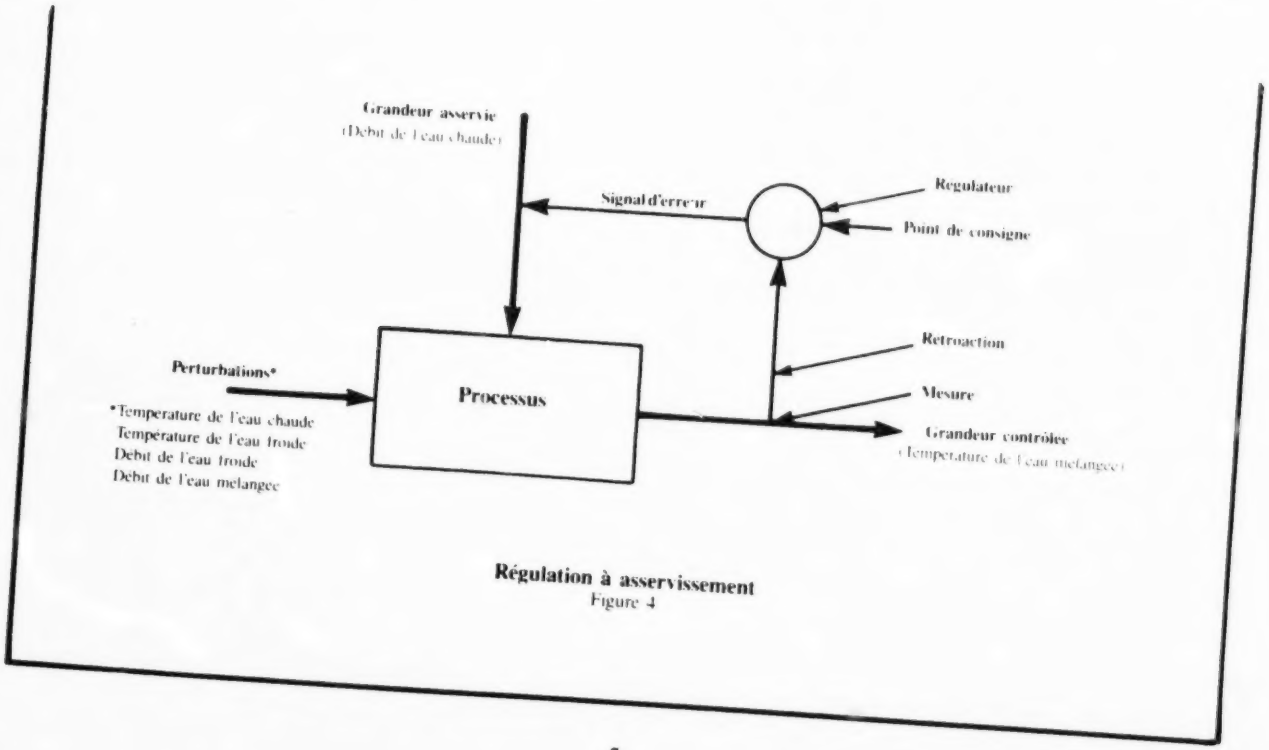
- Différents opérateurs ne réagissent pas nécessairement de la même manière face aux temps de réponse, ce qui provoque un manque d'uniformité dans les réglages.
- L'incapacité d'une entreprise à garder à son service un personnel capable de comprendre et d'interpréter correctement les besoins du processus, peut également créer des problèmes.
- L'inconstance dans la vigilance de l'opérateur et la confusion régnant pendant les changements d'équipes peuvent provoquer des erreurs dans les réglages.



Régulation manuelle
Figure 3

Régulation automatique

La régulation automatique a le double avantage d'éliminer les problèmes liés à l'intervention humaine et d'assurer une meilleure qualité d'exploitation du processus. Reprenons le même exemple et voyons comment la régulation automatique remplace l'opérateur à tous les points de vue (figure 4). Le processus comporte des perturbations,

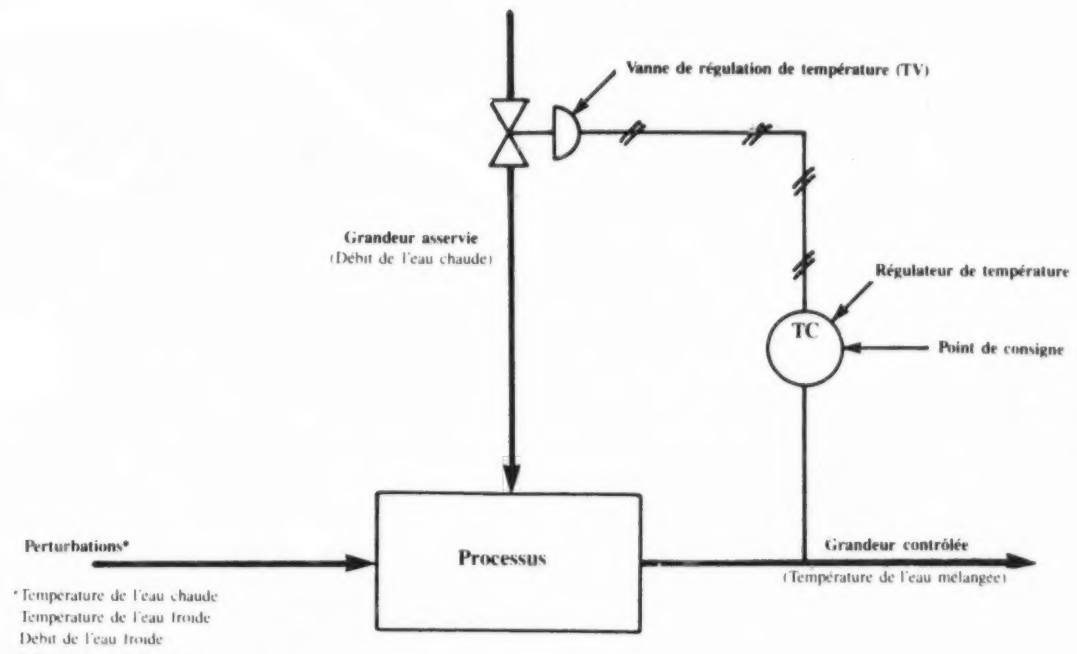


Régulation à asservissement
Figure 4

une grandeur asservie et une grandeur contrôlée. Le régulateur qui nous intéresse doit comporter les trois éléments essentiels suivants:

- Un dispositif qui mesure la grandeur contrôlée pour connaître la réaction du processus.
- Un dispositif qui indique le point de consigne désiré.
- Un dispositif qui produit la valeur de sortie (mécanique, pneumatique, électrique ou hydraulique) à partir du point de consigne et de la grandeur contrôlée. La sortie peut être perçue comme étant un signal d'erreur (c'est-à-dire la différence entre le point de consigne et la grandeur mesurée), d'après lequel la grandeur asservie est modifiée pour éliminer l'écart entre le point de consigne et la valeur de la grandeur contrôlée. Ce mode de régulation qui compare la grandeur contrôlée avec le point de consigne pour déclencher le signal de commande approprié est ce qu'on appelle la *régulation à asservissement*.

Appliquons la régulation à asservissement à l'exemple de processus déjà employé, en y ajoutant les symboles représentant les appareils (figure 5). Le régulateur de température (TC) mesure la température de l'eau mélangée et la compare avec la température de consigne prescrite. D'après le résultat de cette comparaison, un signal de sortie commande le positionnement de la vanne de régulation de la température (TV) pour que celle-ci modifie le débit d'eau chaude et garde la température de l'eau mélangée au point de consigne ou dans son voisinage. *La vanne de régulation est l'élément de réglage final*, c'est-à-dire le dispositif qui reçoit le signal de commande et qui maintient directement ou indirectement la condition désirée du processus. En résumé, le régulateur mesure continuellement la grandeur contrôlée, compare cette valeur d'asservissement avec le point de consigne et transmet le signal approprié à l'élément de réglage final. Si l'on compare la régulation automatique représentée dans la figure 5 avec la régulation manuelle de la figure 3, on voit comment on en tire les avantages décrits précédemment.



Boucle de régulation de température
Figure 5

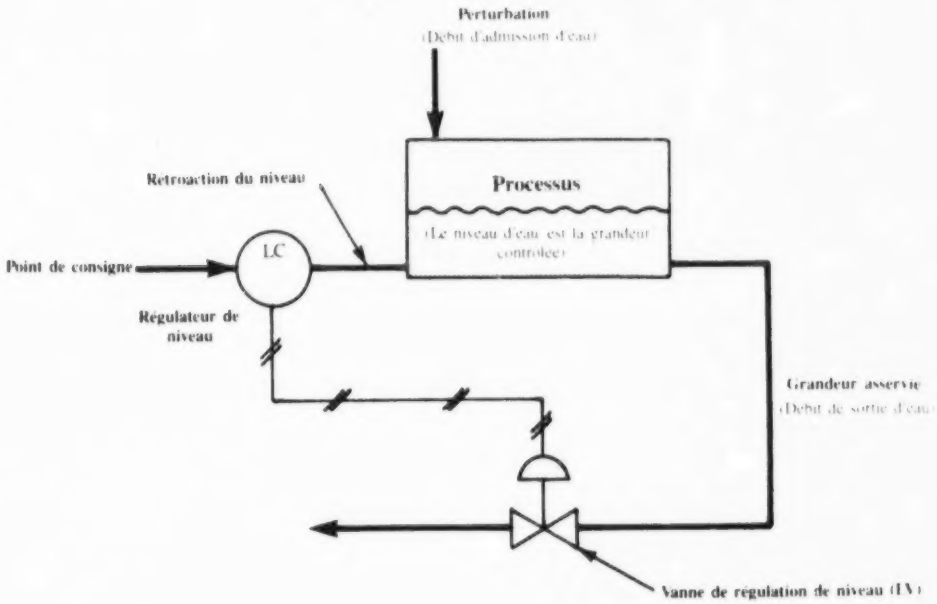
La plupart des processus peuvent être réglés par le biais des éléments de base décrits jusqu'ici. Ajoutons au processus général schématisé dans la figure 1 la nécessité de contrôler le niveau de l'eau dans un réservoir (figure 6). Le processus est le réservoir d'eau, la grandeur contrôlée le niveau d'eau, la perturbation, le débit non réglé de l'eau introduite dans le réservoir et la grandeur asservie, le débit de sortie du réservoir réglé par la vanne de régulation. Le régulateur de niveau (LC) capte le niveau d'eau, le compare au point de consigne et transmet un signal de correction à la vanne de régulation de niveau (LV).

Plusieurs modes de régulation peuvent être appliqués à un processus donné. Les facteurs qui influent sur le choix sont un fonctionnement adéquat, la compatibilité avec le personnel d'exploitation et la rentabilité. Pour aider le lecteur à se fixer un choix, voici une description des modes de régulation les plus couramment utilisés.

Régulation par tout ou rien

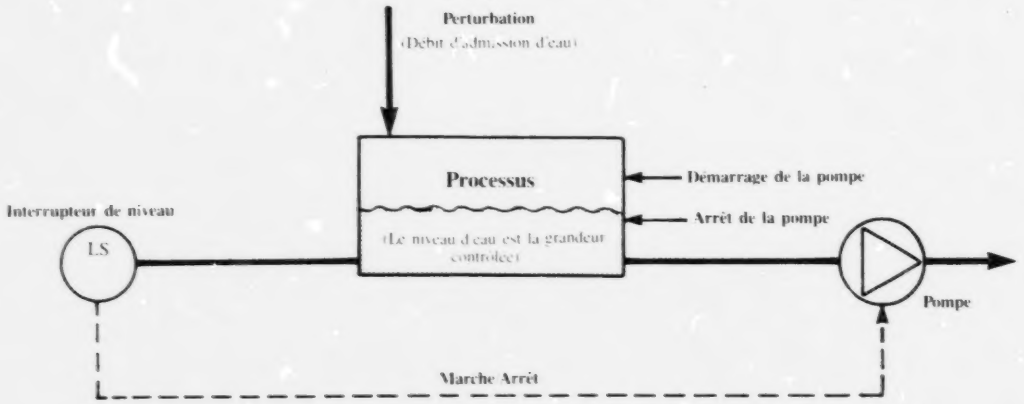
La régulation par tout ou rien est le mode de régulation le plus abordable qui convient à de nombreuses applications. La forme courante de ce mode est caractérisée par une commande de marche et d'arrêt, ou une réaction à une limite maximale et à une limite minimale. Un régulateur de ce type consiste en un interrupteur qui se place à une position lorsque la grandeur mesurée est supérieure au point de consigne et change à l'autre position dans le cas contraire. Les variations sont ainsi rapides et extrêmes. Ce mode de régulation peut satisfaire tous les besoins ou, au contraire, présenter une stabilité insuffisante pour assurer la bonne marche d'un processus. La régulation par tout ou rien s'applique surtout aux cas suivants:

- Lorsque le temps de réponse des appareils de mesure est court, de sorte que la grandeur contrôlée répond rapidement aux modifications apportées à la grandeur asservie;
- Lorsque la capacité de la grandeur contrôlée est assez grande pour éviter les cycles de fonctionnement trop fréquents;
- Lorsque la répétition continuelle des cycles de fonctionnement n'est pas un problème en soi et qu'un certain écart du point de consigne est acceptable.



Boucle de régulation de niveau
Figure 6

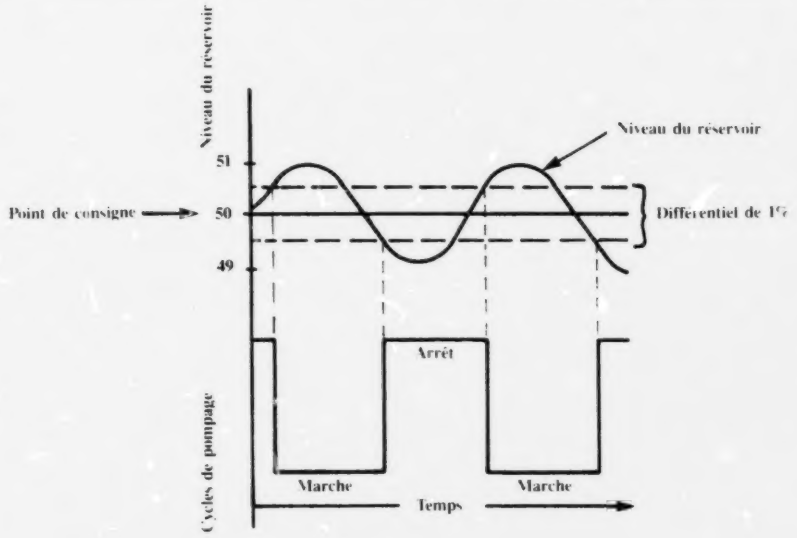
La régulation par tout ou rien applique elle aussi, le principe à asservissement pour commander un processus. La figure 7 montre un système simple où le processus (niveau du réservoir) est mesuré par un interrupteur de niveau (LS) qui asservit la pompe de la conduite de vidange du réservoir. Lorsque le niveau atteint un point déterminé, la pompe se met en marche. Le niveau d'eau baisse au point où l'interrupteur de niveau arrête la pompe. Éventuellement, le niveau du réservoir atteint de nouveau le point de démarrage de la pompe et le cycle se répète. La caractéristique de régulation principale de l'interrupteur de niveau est le *différentiel*, soit la différence de valeur de la grandeur contrôlée (niveau d'eau) qui provoque l'arrêt ou le démarrage de la pompe asservie au régulateur de niveau (LS). Le différentiel de nombreux dispositifs de régulation se règle de façon que le fonctionnement du système réponde aux besoins du processus. Pour mettre ce système en service, il faut régler l'écart admissible entre les deux niveaux correspondant aux points de démarrage et d'arrêt (différentiel), et régler le point de consigne selon le niveau désiré du réservoir (c'est-à-dire déterminer si l'action de marche/arrêt doit se produire autour de 40 ou 80% du niveau du réservoir).



Régulation par tout ou rien
Figure 7

Une régulation par tout ou rien, lorsqu'elle est correctement appliquée, peut habituellement maintenir la grandeur contrôlée à moins de 3% de la limite supérieure de la gamme de mesure. Dans le cas d'un réservoir dont le niveau peut être de 0 à 5 mètres, le différentiel peut être fixé à 0,15 mètre (soit 3% de 5 mètres). Si cela représente une trop grande variation de niveau, il suffit de le réduire à 0,05 mètre (1% de 5 mètres), mais cela augmente la fréquence des cycles. Dans la figure 8, la pompe démarre lorsque le niveau atteint 50,5% et s'arrête lorsque le niveau descend à 49,5%. La courbe de niveau montre la répétition du cycle et comment le niveau réel dépasse les limites supérieure et inférieure du différentiel. Si le différentiel de l'interrupteur de niveau était réglé à 2% au lieu de 1%, l'amplitude des variations de niveau augmenterait et les cycles de marche/arrêt par unité de temps seraient moins fréquents.

On a déjà mentionné que l'application de ce mode de régulation dépend de la capacité de la grandeur contrôlée. L'objectif est de bien régler cette grandeur contrôlée tout en évitant des cycles de marche/arrêt trop fréquents qui pourraient endommager l'équipement. Dans l'exemple de processus (figures 7 et 8), la capacité du processus serait suffisante si la section transversale du réservoir était relativement importante par rapport aux débits d'admission et de refoulement. Cependant, en poussant cet exemple à l'extrême, le diamètre du réservoir ne pourrait être que de 300 mm, une pompe abaisserait rapidement le niveau à la limite inférieure, à laquelle elle s'arrêterait brièvement avant de démarrer de nouveau. La régulation serait instable dans de telles conditions. La régulation par tout ou rien s'applique de façon satisfaisante, par exemple, au réglage de niveau des réservoirs et des puisards, du chauffage par convection et de la pression de vapeur des ballons de chaudières de petites dimensions.



Régulation de processus par tout ou rien
Figure 8

Régulation proportionnelle

Concept

Bien que la régulation par tout ou rien soit le mode de régulation le moins coûteux, elle est parfois inacceptable pour certains types de processus. Souvent une régulation continue s'impose pour uniformiser la marche du processus et pour rapprocher la grandeur contrôlée du point de consigne. Il est donc important de comprendre les divers modes de régulation proportionnelle existants, afin d'obtenir un rapport rendement — coût optimum.

La *régulation proportionnelle* englobe tout mode de régulation selon lequel la grandeur asservie peut être réglée à n'importe quelle position à l'intérieur d'une gamme de régulation pour maintenir la grandeur contrôlée au point de consigne. Dans le domaine de la technologie moderne, ce terme s'applique à certains régulateurs mécaniques et hydrauliques, à des dispositifs analogiques pneumatiques et électroniques et à la régulation analogique simulée obtenue par ordinateur. La différence entre un signal analogique et un signal numérique doit être expliquée avant de décrire les diverses formes d'actions de régulation.

- Un signal de mesure ou de commande analogique est un signal qui peut être continuellement observé. Une montre classique avec des aiguilles en est un exemple, les aiguilles se déplaçant constamment pour indiquer l'heure.
- Un signal numérique est un signal qui fournit l'information sous la forme de nombres. Une montre à affichage numérique peut indiquer les heures, les minutes et les secondes, mais elle ne donne pas une indication continue comme la montre à aiguilles. En pratique, la montre à affichage numérique indique les changements d'heure à la fréquence nécessaire et on peut dire qu'en fait, l'heure se lit avec une plus grande précision que sur une montre à aiguilles.

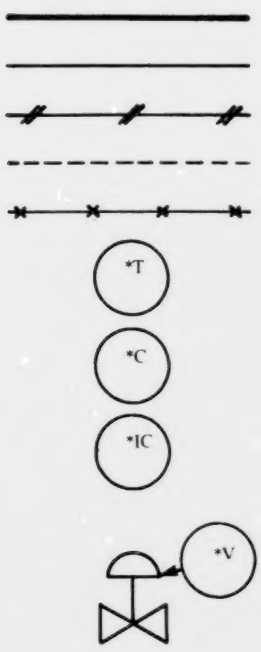
Systèmes de signalisation

Les types courants de transmetteurs emploient des signaux pneumatiques ou électroniques. Pour choisir le genre de signal qui convient, on doit tenir compte des considérations suivantes:

- La gamme des *signaux pneumatiques* se situe généralement entre 21 et 103,5 kPa (eff.), les signaux étant transmis par des tuyaux de cuivre ou de plastique. La limitation la plus sérieuse est le temps mis pour acheminer les signaux sur de grandes distances. La distance de transmission dans les boucles de régulation pneumatique devrait être limitée à 150 mètres.
- La distance de transmission des *signaux électroniques* se limite à 1 500 m, ce qui convient à la plupart installations industrielles, commerciales et à caractère public. C'est pour cette raison que la signalisation électronique a supplanté la signalisation pneumatique, en plus du fait qu'elle présente l'avantage de produire des signaux compatibles avec les ordinateurs. Le signal électronique le plus courant est de 4 à 20 mA.

La figure 9 identifie les symboles de base représentant les types de signaux et d'appareils utilisés dans les schémas de régulation de processus.

Voici une revue des divers modes de régulation proportionnelle à employer pour assurer le bon fonctionnement des processus.



Processus

Raccordement au processus

Signal pneumatique

Signal électrique

Tube capillaire

Transmetteur

Régulateur sans affichage

Régulateur-indicateur

Vanne de régulation

* Pour le débit	F
la pression	P
le niveau	L
la température	T

Symboles pour appareils de régulation
Figure 9

Régulateurs autonomes

Un régulateur autonome, selon la terminologie de la régulation automatique, est un dispositif qui mesure, contrôle et règle une boucle de régulation (figure 10). En d'autres termes, il s'agit d'un appareil monobloc qui ne nécessite aucune source d'énergie extérieure telle que de l'air comprimé ou un courant électrique. Normalement, il tire son énergie motrice directement du fluide qu'il règle.

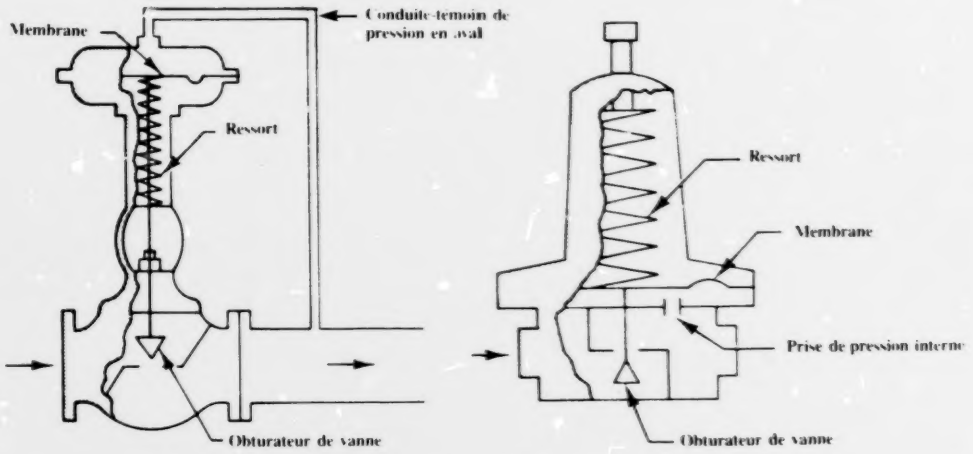
Le tableau 1 résume les avantages et les inconvénients des régulateurs autonomes. Ils sont généralement plus abordables qu'une combinaison de vannes de régulation, de transmetteurs et de régulateurs et coûtent moins cher à installer et à entretenir. Par contre, pour des dimensions supérieures à NPS 6, l'avantage économique des régulateurs disparaît et c'est la combinaison de vannes de régulation, de régulateurs et de transmetteurs qui devient plus intéressante.

Les régulateurs comportent un organe de réglage et un capteur intégrés, et n'exigent pas d'alimentation en air comprimé. Ils ne sont donc pas affectés par une panne d'air comprimé et peuvent être installés dans des endroits interdits aux vannes de régulation. L'emploi des régulateurs est limité par les matériaux de fabrication, par leur pression et température nominales, et par leur incapacité d'être commandés à distance. Théoriquement, il peut exister autant de types de régulateurs qu'il existe de paramètres de processus. Les applications les plus courantes sont la régulation du niveau, du débit, du vide, de la pression et de la température. Les deux types les plus répandus sont les régulateurs de pression et les régulateurs de température.

Régulateurs à mesure directe

Les régulateurs à mesure directe intègrent un dispositif de mesure et constituent le prolongement logique des régulateurs autonomes. Ils se distinguent toutefois des régulateurs par trois avantages détaillés:

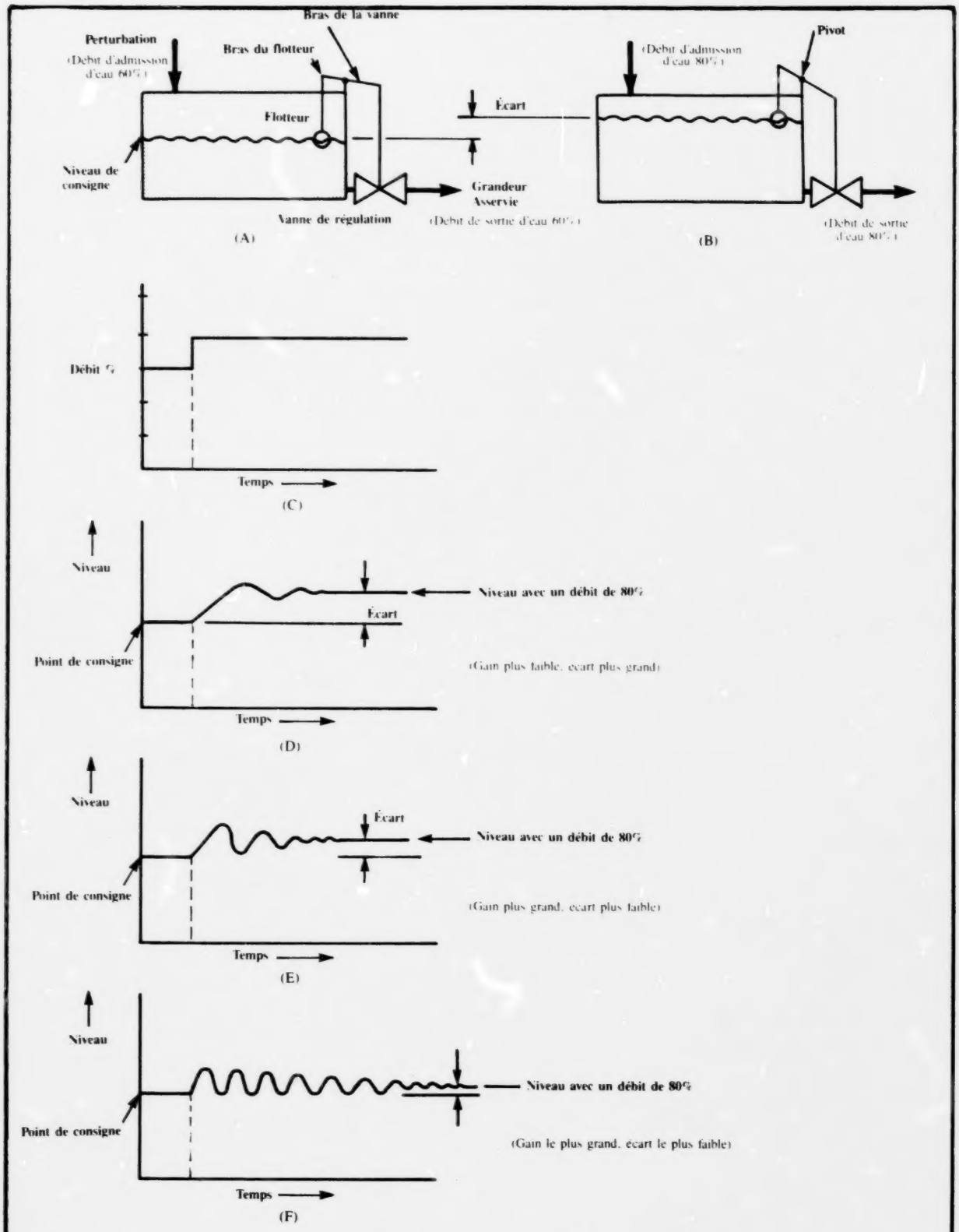
- Ils permettent la sélection de plusieurs modes de régulation qui assurent un meilleur fonctionnement.
- Le signal de sortie du régulateur permet la commande à distance de l'élément de réglage final. On obtient ainsi une plus grande souplesse de conception du processus et de la tuyauterie.
- Le régulateur peut comprendre un commutateur automatique-manuel pour la commande automatique ou manuelle de l'élément de réglage final.



Régulateurs autonomes de réduction de pression
Figure 10

COMPARAISON ENTRE RÉGULATEURS AUTONOMES ET VANNES DE RÉGULATION
TABLE 1

	Avantages	Inconvénients
Régulateurs autonomes	• Faible coût dans les petites dimensions. • Encombrement moindre que la vanne de régulation équivalente. • Coût d'installation moins élevé. • Régulateur et capteurs intégrés. • Indicateur intégré faculatif	• Télécommande impossible. • Le réglage du point de consigne doit se faire au régulateur. • Action corrective exclusivement proportionnelle, donc écart permanent inévitable • Matériaux de construction limités. • Applications limitées par les restrictions de température et de pression du modèle de corps.
Vannes de régulation	• Comman de à distance par régulateur appliquant n'importe quelle action corrective. • Grande variété de matériaux de construction. • Aucune restriction quant à la position de sécurité intrinsèque. • Convient une grande variété de services et de conditions de fonctionnement. • Grande variété de modèles de corps de vanne. • Plusieurs types d'actionneurs.	• Prix d'achat plus élevé. • Coût d'installation plus élevé. • Nécessite une source d'énergie, généralement air comprimé. • Risques de panne de la sources d'énergie • Plus lourd et plus encombrant.



Régulation proportionnelle
Figure 11

Régulation proportionnelle

La sortie d'un régulateur proportionnel a une relation linéaire prévisible avec l'écart (signal d'erreur) entre le point de consigne et la grandeur contrôlée. Cette relation peut être clairement illustrée par l'exemple de processus et les courbes de réponse représentés dans la figure 11. La disposition du flotteur et du robinet de réglage ne constitue pas un exemple type de système de régulation proportionnelle, mais elle est utile pour expliquer les principes en cause.

L'action proportionnelle provient du flotteur reposant sur le liquide et raccordé par une tringlerie à une vanne de régulation. Dans le premier schéma, le niveau coïncide avec le point de consigne et les débits d'admission et de sortie sont réglés à 60% de leur capacité nominale (figure 11-A). Le débit d'admission d'eau, soit la perturbation, augmente subitement par un changement d'échelon à 80% de sa capacité (figure 11-C) et fait monter le niveau du réservoir. Le flotteur ainsi que sa tringlerie montent avec le niveau d'eau tandis que la tringlerie liée à la vanne de régulation descend. La descente de la tringlerie de la vanne de régulation provoque l'ouverture proportionnelle de la vanne et permet au débit de sortie d'augmenter. Éventuellement, le système retrouve son équilibre (figure 11-B): le flotteur positionne la vanne de régulation de façon que la grandeur asservie (80% du débit de sortie d'eau) soit égale à la perturbation (80% du débit d'admission d'eau).

La sensibilité (gain) du régulateur se règle en modifiant la longueur de bras du flotteur et de la vanne. Si on raccourcit le bras du flotteur et qu'on allonge celui de la vanne, l'ouverture de la vanne de régulation est complète lorsque survient une plus faible variation de niveau du réservoir. Cela donne un plus grand gain au régulateur.

Trois courbes de réponse du niveau par rapport au temps sont présentées selon divers réglages du gain, de faible à élevé aux figures 11 D, 11 E et 11 F. Il est à noter que le niveau du réservoir présente un écart permanent lorsque le débit de la perturbation est différent de celui qui existait au moment de la mise au point du système. C'est là une caractéristique de l'action proportionnelle qu'on ne peut pas éviter. Il faut savoir cependant que cet écart permanent diminue à mesure qu'on augmente le gain. Malheureusement, des conditions de marche instables peuvent survenir si l'on augmente trop le gain. Par contre, la présence d'un certain écart permanent étant souvent acceptable, ce mode de régulation simple et moins coûteux peut répondre aux besoins de l'installation.

Le gain est un nombre sans unité qui se calcule d'après l'équation suivante:

$$\text{Gain} = \frac{\%\text{ variation de la sortie du régulateur}}{\%\text{ variation de l'erreur d'entrée}}$$

où (1) pour l'exemple de la figure 11, la sortie du régulateur est mesurée en pourcentage de l'ouverture du robinet;

(2) signal d'erreur = consigne — niveau réel

Si la variation maximale du niveau du réservoir est de 160 mm, c'est cette valeur qui équivaut à 100%. Si la différence entre le point de consigne et le niveau réel est de 40 mm, alors:

$$\%\text{ variation de l'erreur d'entrée} = \frac{40 \times 100}{160} = 25\%$$

Par conséquent, si un écart de 40 mm entre le point de consigne et le niveau réel provoque l'ouverture complète (100%) du robinet de réglage, le gain s'exprime comme suit:

$$\text{Gain} = \frac{100\%}{25\%}$$

$$= 4$$

Il s'agit ici d'un gain relativement élevé qui devrait réduire l'écart permanent à une valeur assez faible. Un gain inférieur exigerait que l'erreur d'entrée soit de 160 mm (100% de la variation maximale) pour que la course d'ouverture du robinet de réglage corresponde à 100%. Le gain serait alors:

$$\text{Gain} = \frac{100\%}{100\%}$$

$$= 1$$

La bande proportionnelle est un autre terme qui définit le gain. Elle représente en fait l'inverse du gain proprement dit et s'exprime comme suit:

$$\text{Bande proportionnelle} = \frac{1 \times 100\%}{\text{Gain}}$$

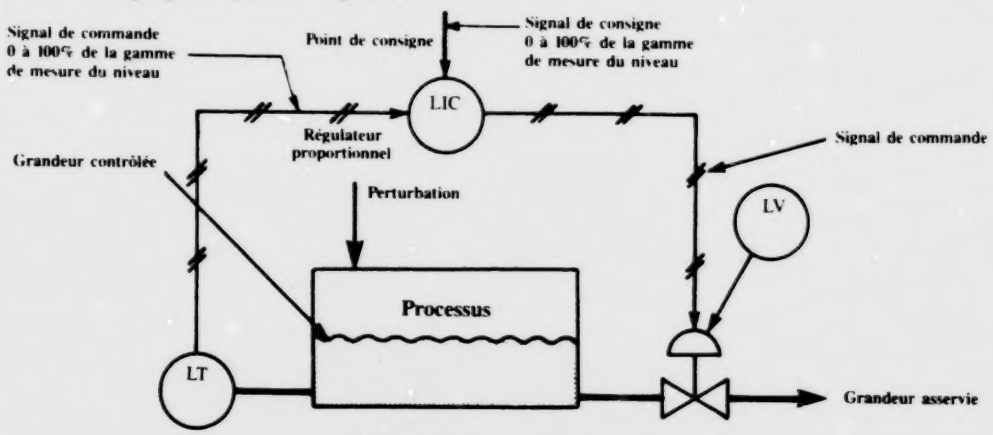
Les deux bandes proportionnelles équivalentes aux deux calculs de gain précédents seraient les suivantes:

$$\text{Bande proportionnelle} = \frac{1 \times 100}{4} = 25\%$$

$$\text{Bande proportionnelle} = \frac{1 \times 100}{1} = 100\%$$

Prenons un type général de boucle de régulation proportionnelle pour illustrer comment le gain est déterminé avec un régulateur proportionnel plus courant (figure 12). Le transmetteur de niveau (LT) est conçu pour une certaine variation du niveau du réservoir qui fait passer le signal du transmetteur de 0 à 100%. Le signal du point de consigne est réglable et utilise la même gamme de signalisation que le transmetteur, et la variation de 0 à 100% de ce signal représente la même variation de niveau du réservoir que celle donnée par l'étalonnage du transmetteur de niveau. Le régulateur de niveau proportionnel remplit deux fonctions:

- Il détermine le signal d'erreur entre les signaux du point de consigne et de la variable mesurée (% du signal du point de consigne — % du signal de la grandeur mesurée).
- Il effectue le réglage du gain au signal d'erreur.



Régulateur proportionnel
Figure 12

Supposons que le processus est en équilibre lorsque les signaux du transmetteur de niveau et du point de consigne sont tous les deux à 40% et que le signal de sortie du régulateur transmis au robinet de réglage est de 50%. Une perturbation fait subitement monter le niveau du réservoir à 50%, le point de consigne reste à 40% et la sortie du régulateur passe à 80% pour ouvrir plus grand le robinet de réglage. On peut ainsi calculer le gain du régulateur selon la même équation:

$$\text{Gain} = \frac{\%\text{ variation à la sortie du régulateur}}{\%\text{ variation de l'erreur d'entrée}}$$

$$= \frac{80 - 50}{50 - 40}$$

$$= 3$$

En résumé, la régulation proportionnelle est relativement simple à employer et son coût est moyen. L'inconvénient majeur réside dans le fait qu'il existe un écart permanent quelles que soient les conditions de service, sauf celles qui existaient au moment de l'étalonnage du système. Lorsqu'un écart permanent n'est pas acceptable pour le processus, la régulation doit être plus raffinée. Si on la compare à la régulation par tout ou rien, la régulation proportionnelle permet une mise au point plus précise pour obtenir un fonctionnement sans heurt ainsi qu'une régulation uniforme.

Régulation intégrale

L'action intégrale est un mode de régulation qui permet d'éliminer l'écart permanent qui caractérise la régulation proportionnelle. L'action intégrale est plus couramment utilisée en combinaison avec l'action proportionnelle, mais elle sera d'abord décrite séparément.

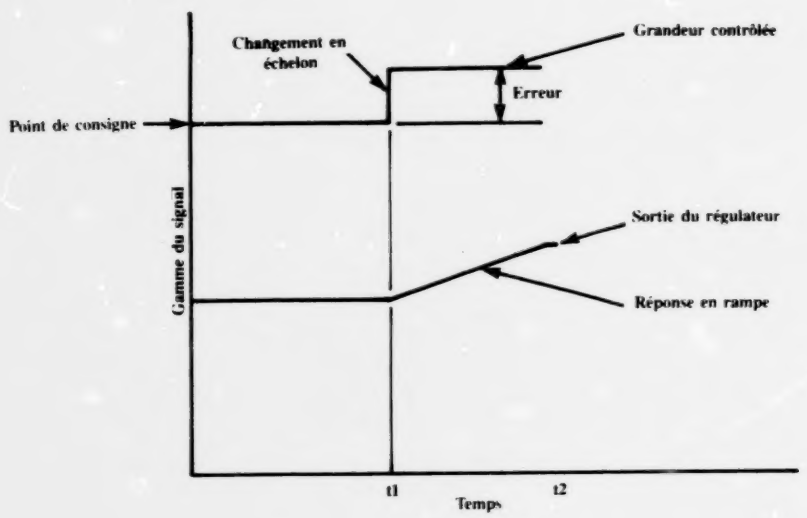
La sortie d'un régulateur intégral varie en fonction de l'amplitude du signal d'erreur (point de consigne — grandeur contrôlée) et la durée de l'erreur. Le terme «intégral» tire son origine de l'expression mathématique selon laquelle la sortie du régulateur est égale à l'intégrale de la durée du signal d'erreur.

La réponse du régulateur est représentée schématiquement dans la figure 13. Au départ, la grandeur contrôlée correspond au point de consigne et le système est en équilibre. Au moment t_1, une perturbation se produit dans le processus et modifie la grandeur contrôlée par un changement en échelon. Cela crée un signal d'erreur constant dans l'intervalle t_1 à t_2 et par conséquent, la sortie du régulateur varie à un taux constant pour tenter d'éliminer le signal d'erreur. La figure 13 ne montre pas le retour de la grandeur contrôlée au point de consigne, mais cela se produit éventuellement. Bref, la sortie de ce type de régulateur prend n'importe quelle valeur à l'intérieur de la gamme du signal de sortie pour modifier la grandeur asservie afin que la grandeur contrôlée soit maintenue au point de consigne.

L'action intégrale est réglable et s'effectue de deux façons:

- Par le nombre de répétitions par minute: il s'agit du nombre de fois que le signal d'erreur se reproduit comme variation du signal de sortie du régulateur dans une minute. La gamme de réglage des régulateurs électroniques est assez vaste, soit de 0,1 à 100 répétitions par minute.
- Par le temps de répétition: il s'agit du temps que prend le signal d'erreur pour se reproduire une fois dans le signal de sortie du régulateur.

Normalement, l'action intégrale se combine à l'action proportionnelle de la façon décrite ci-après.

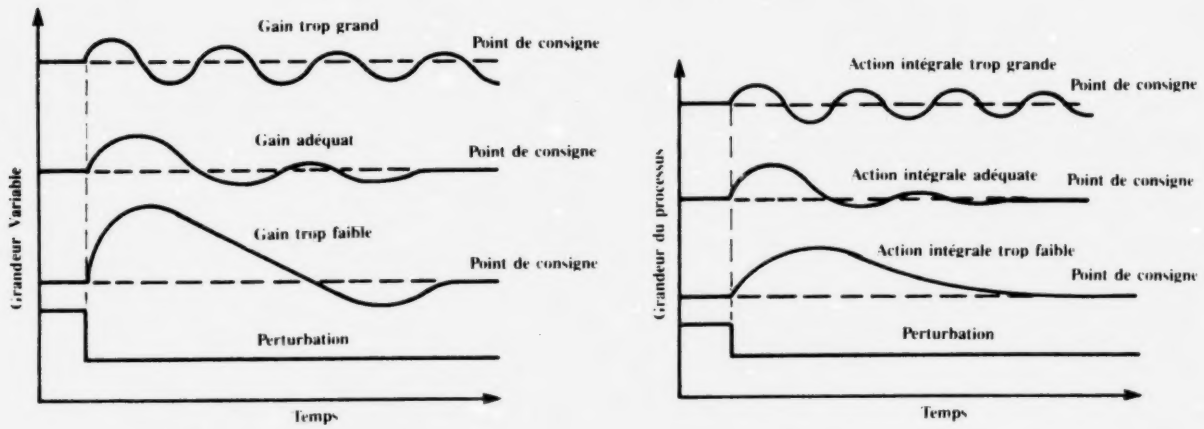


Action intégrale
Figure 13

Action proportionnelle et intégrale

L'action proportionnelle et intégrale (P.I.) est la combinaison de "mode" de contrôle la plus courante. On peut considérer séparément l'action proportionnelle et l'action intégrale comme nous l'avons fait précédemment, mais il faut noter que la sortie des deux modes individuels s'additionne avant de quitter le régulateur. Il a été expliqué que pour un signal d'erreur à changement en échelon (point de consigne — grandeur contrôlée), l'action proportionnelle agit également sous forme d'un changement en échelon, tandis que l'action intégrale agit sous forme d'un changement en rampe. L'addition des deux réponses signifie que la sortie du régulateur varie sur-le-champ sous forme d'un échelon et qu'ensuite, un changement en rampe intervient pour continuer de varier la sortie du régulateur plus loin dans la même direction. L'ampleur de l'échelon de la variation de sortie du régulateur est fonction du réglage du gain alors que la pente de la rampe est fonction du réglage de l'action intégrale. L'effet amplificateur du gain donne à la grandeur asservie un «élan» initial, puis l'action intégrale cherche le nouveau signal de sortie nécessaire pour maintenir la grandeur asservie au point de consigne sans qu'il y ait d'écart permanent.

La figure 14 montre combien le réglage du gain de l'action proportionnelle et le réglage de l'action intégrale peuvent influencer la façon dont la grandeur asservie est ramenée au point de consigne. Il est intéressant de noter que la réaction à l'intérieur du processus est pratiquement identique lorsque l'un ou l'autre réglage est trop élevé ou trop faible.



Action proportionnelle et intégrale d'un régulateur
Figure 14

Régulation dérivée

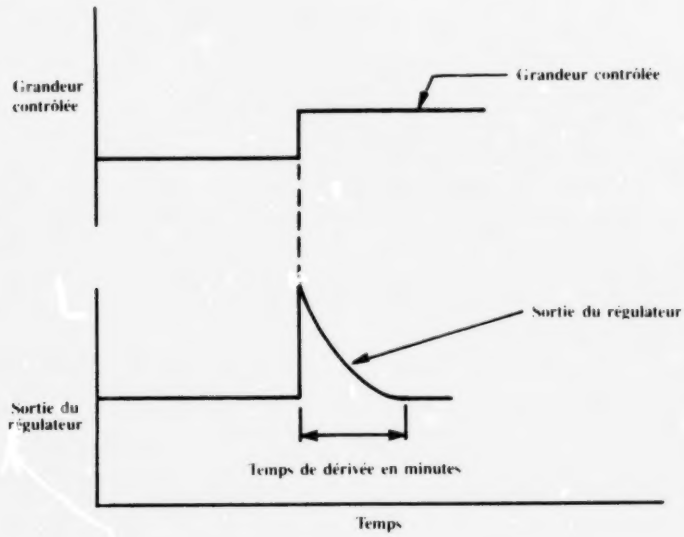
L'action dérivée se combine habituellement à l'action proportionnelle et intégrale, mais la figure 15 la représente séparément pour en faciliter la compréhension. L'action dérivée provoque dans la sortie du régulateur une première réaction très marquée qui se dissipe avec le temps. Ainsi, la correction reçoit au début un «élan» qui permet à la grandeur asservie de varier rapidement pour ramener la grandeur contrôlée au point de consigne ou dans son voisinage. Le taux de réglage d'un régulateur de ce type, soit la mesure de la rapidité avec laquelle l'action initiale est éliminée de la sortie du régulateur, peut s'étendre de 0,1 à 25 minutes.

L'action dérivée sert à contrebalancer les temps de réponse de certains processus comme ceux comportant le transfert de variations de température.

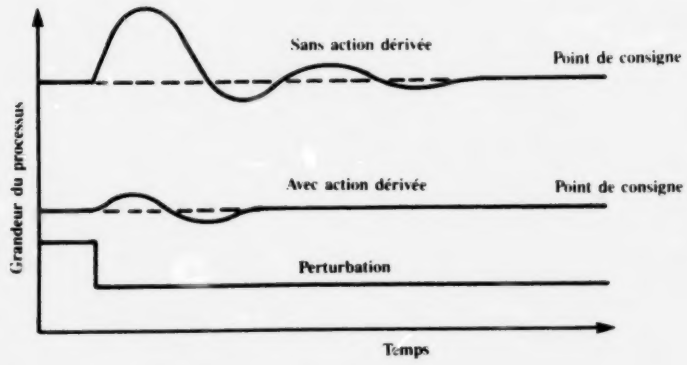
Action proportionnelle, intégrale et dérivée (P.I.D.)

Les régulateurs à action proportionnelle, intégrale et dérivée s'appellent couramment des régulateurs P.I.D.. Ces régulateurs se combinent normalement aux processus ayant de longs temps de réponse, et on doit les réserver à des cas particuliers car il est difficile de bien les régler. Ces régulateurs présentent une caractéristique pratique: Suivante: si l'on doute de la capacité d'un régulateur P.I. de répondre aux exigences du processus, on peut acheter un régulateur P.I.D. et neutraliser l'action dérivée si celle-ci rend le système instable. Le seul inconvénient devient la dépense pour une caractéristique non utilisable.

La figure 16 montre comment l'action dérivée peut réduire l'écart initial entre la grandeur contrôlée et le point de consigne et ramener rapidement le processus au point de consigne.



Action dérivée d'un régulateur
Figure 15



Réponse d'un régulateur
P.I.D. avec et sans action dérivée
Figure 16

Eléments de réglage final

Fonction

L'«élément de réglage final» a déjà été décrit et représenté dans divers schémas. On utilise l'élément de réglage final pour modifier la grandeur asservie afin de faire correspondre la grandeur contrôlée et le point de consigne.

Les vannes de régulation sont les éléments de réglage final les plus courants. Bien que la vanne soit asservie à un actionneur, l'ensemble complet est considéré comme l'élément de réglage final.

Des servomoteurs et autres dispositifs de manoeuvre sont employés pour positionner la tringlerie qui commande des registres, des volets d'admission d'air de ventilateur, des entraînements à vitesse variable et une foule d'autres éléments de réglage final. Des dispositifs d'alimentation automatique peuvent également constituer des éléments de réglage final.

Positionneurs

Il y a plusieurs types de vannes de régulation: certains seront décrits dans le chapitre sur l'appareillage. Ils sont souvent équipés d'un positionneur qui procure les avantages suivants:

- Il améliore la réponse de l'élément de réglage final, tout particulièrement dans les systèmes pneumatiques, en surmontant le frottement mécanique des joints et des paliers et les forces déséquilibrées qui s'exercent sur l'obturateur de la vanne.
- Il assure une plus grande puissance pour déplacer l'élément de réglage final. Dans un système pneumatique, la pression d'alimentation du positionneur peut être beaucoup plus grande que le signal de commande, produisant ainsi une plus grande force motrice.
- Le mécanisme d'asservissement entre le positionneur et l'élément de réglage final peut servir à éliminer les effets du frottement et de l'hystérésis.
- Le mécanisme d'asservissement de certains positionneurs intègre des cames qui modifient les caractéristiques du rapport entre le signal de commande et la grandeur asservie.

Capacité des vannes de régulation

La bonne sélection d'une vanne de régulation exige une excellente connaissance de plusieurs facteurs, notamment le processus lui-même, les critères de conception de l'utilisateur et le coût.

Une vanne de régulation est un appareil à orifice variable qui sert à régler le débit d'un liquide, d'un gaz ou de la vapeur. Pour que la vanne règle le débit, une certaine énergie doit être absorbée sous la forme d'une pression différentielle (chute de pression) au travers de la vanne. Ainsi, en termes pratiques, une vanne de régulation est un dissipateur d'énergie. Plus la restriction de débit est forte, plus le différentiel de pression augmente au travers de la vanne et plus la quantité d'énergie dissipée par celle-ci est élevée.

La fonction d'une vanne de régulation, dans des conditions de débits minimal et maximal, est décrite de façon schématique dans la figure 17. Les pertes de charge qui se produisent dans le processus sont plus faibles lorsque le débit est minimal et plus fortes lorsqu'il est maximal. La vanne de régulation permet de modifier le profil des pertes de charge de façon à toujours obtenir la pression voulue à la sortie du système. Voilà pourquoi la pression différentielle dans une vanne de régulation est plus grande lorsque le débit est minimal et plus faible lorsqu'il est maximal. Une perte de charge excessive constitue un gaspillage d'énergie. Cependant, si la perte de charge dans la vanne est trop faible par rapport à l'ensemble des pertes de charge dans tout le processus, le réglage risque d'être insatisfaisant.

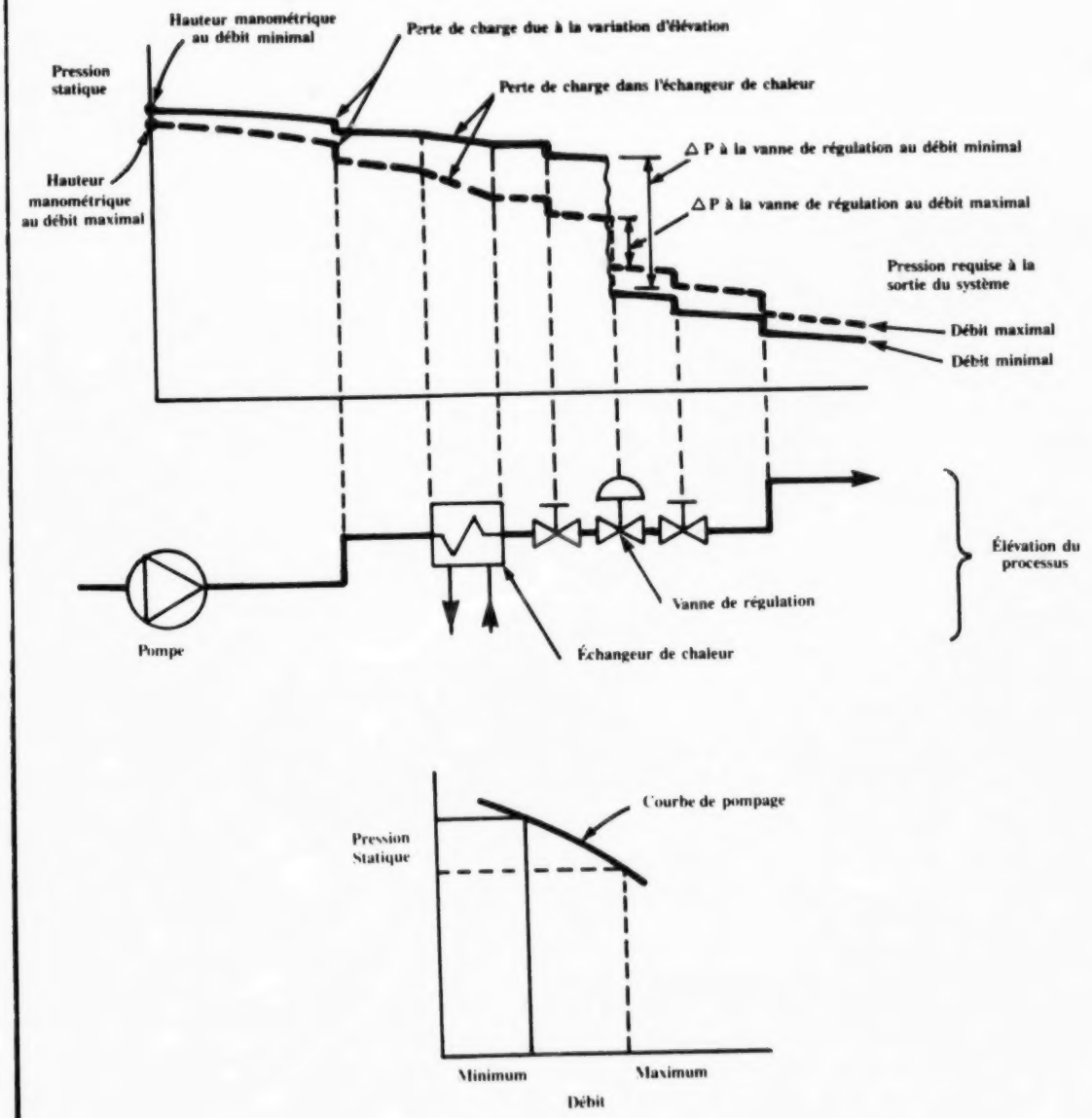
Il faut bien choisir la capacité des vannes de régulation pour que ces dernières puissent optimiser le processus, minimiser le coût de l'investissement et assurer le réglage approprié du fluide. Malheureusement, certaines vannes de régulation sont choisies d'après des données approximatives et avec des coefficients de sécurité élevés. Par conséquent, on choisit des vannes de plus grande capacité, car «trop grand vaut mieux que trop petit». Il en résulte une régulation inadéquate parce que la vanne est presque fermée dans des conditions normales de marche. Les pièces de l'obturateur s'usent alors prématurément. En outre, les vannes de grande dimension sont dispendieuses et ne peuvent fournir la modulation nécessaire pour obtenir un bon contrôle.

La vanne de régulation doit avoir une gamme de réglage supérieure aux exigences du processus. Le rapport débit maximal-minimal est ce qu'on appelle la *marge de réglage effective*.

Les fabricants de vannes de régulation peuvent fournir des tables et des règles de calcul pour déterminer la capacité des vannes, mais le calcul final est souvent fait par ordinateur. L'importance des données de conception précises à déjà été soulignée et l'utilisateur doit s'assurer que toutes les données sont exactes. Il doit transmettre au fabricant de vannes toutes les informations essentielles, notamment:

- La nature du fluide à régler et les conditions du processus telles que la pression et la température maximales, la densité et la viscosité, ainsi que la teneur en solides s'il s'agit d'une boue.

- Le débit maximal nécessaire et la perte de charge correspondante.
- Le débit minimal nécessaire et la perte de charge correspondante.
- Les matériaux de composition des tuyauteries adjacentes.
- La pression d'alimentation pneumatique.



Perte de charge dans une vanne de régulation
Figure 17

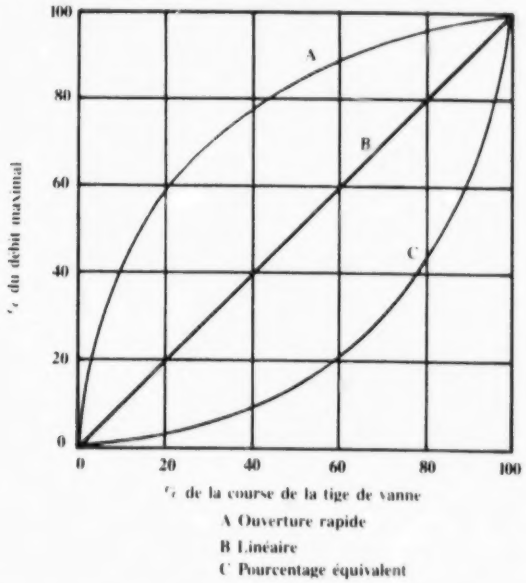
Caractéristiques des vannes

La bonne sélection des caractéristiques de l'élément de réglage final et la mise au point de ces caractéristiques peuvent contribuer grandement au bon rendement d'une boucle de régulation. La sécurité du système pourrait même être compromise si l'élément de réglage final ne convenait pas.

Les caractéristiques du débit réel circulant dans la vanne de régulation doivent être analysées avec soin (figure 18). L'ouverture rapide (A) est une caractéristique très courante dans les régulateurs de pression autonomes où la réponse du processus est immédiate. La caractéristique linéaire (B) peut assurer un mode de régulation intéressant lorsque la perte de charge dans la vanne est constante. Il y a un rapport linéaire entre le mouvement de la tige de la vanne (ouverture) et le débit. Le pourcentage égal (C) est la caractéristique la plus courante du fait qu'elle fournit un débit moindre en position presque fermée. Cette caractéristique aide à éliminer l'écart permanent dans beaucoup de processus où la perte de charge dans la vanne est plus grande en position presque fermée et plus faible en position ouverte de plus de 50%. On obtient alors un meilleur rapport linéaire entre le degré d'ouverture de la vanne et le débit.

Sécurité intrinsèque

Lorsque l'on conçoit un système de régulation, il importe de choisir un élément de réglage final qui assure la sécurité du système s'il y a perte de signal de commande. La vanne de régulation remplit habituellement cette fonction avec l'aide d'un ressort robuste qui la ferme en cas d'absence de signal ou d'alimentation en air. Beaucoup de processus comprennent des systèmes de sécurité distincts fournissant une protection qui s'ajoute à la simple caractéristique de sécurité intrinsèque de la vanne.



Caractéristique de débit d'une vanne de régulation
Figure 18

Améliorations du système de régulation

Les composants de base d'un système de régulation, soit les transmetteurs, les régulateurs et les éléments de réglage final, ont tous été décrits, ainsi que les divers types d'actions de régulation. Le présent ouvrage a été conçu pour aider le lecteur à déterminer les modes de régulation et les appareils convenant à la plupart des applications. Cependant, il y a des applications où il peut être rentable d'améliorer le système de régulation même si cela exige l'ajout d'appareillage supplémentaire ou une mise en service plus longue. On tient habituellement compte de ces options dans les cas suivants:

- Lorsque les perturbations du processus sont importantes et que les écarts entre la grandeur contrôlée et le point de consigne sont indésirables.
- Lorsque le temps de réponse du processus et des appareils de mesure rendent la régulation particulièrement difficile.

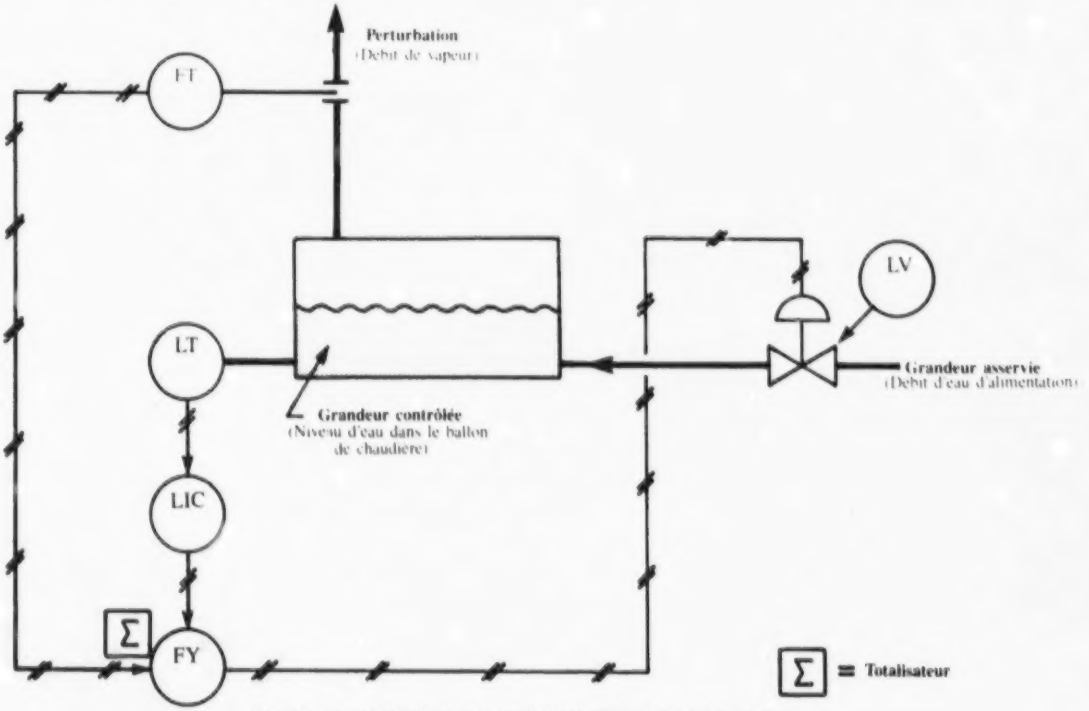
Dans ces cas, on ne doit envisager des dépenses supplémentaires pour améliorer le système que si les améliorations apportées au processus sont rentables. Cependant, la sécurité reste toujours le critère de conception le plus important.

Régulation par anticipation

La *régulation par anticipation* est un bon exemple d'amélioration d'un système de régulation. Ce mode est parfois appelé régulation à éléments multiples (généralement deux ou trois éléments). Son principe de fonctionnement est démontré par l'exemple de régulation de niveau de la figure 19.

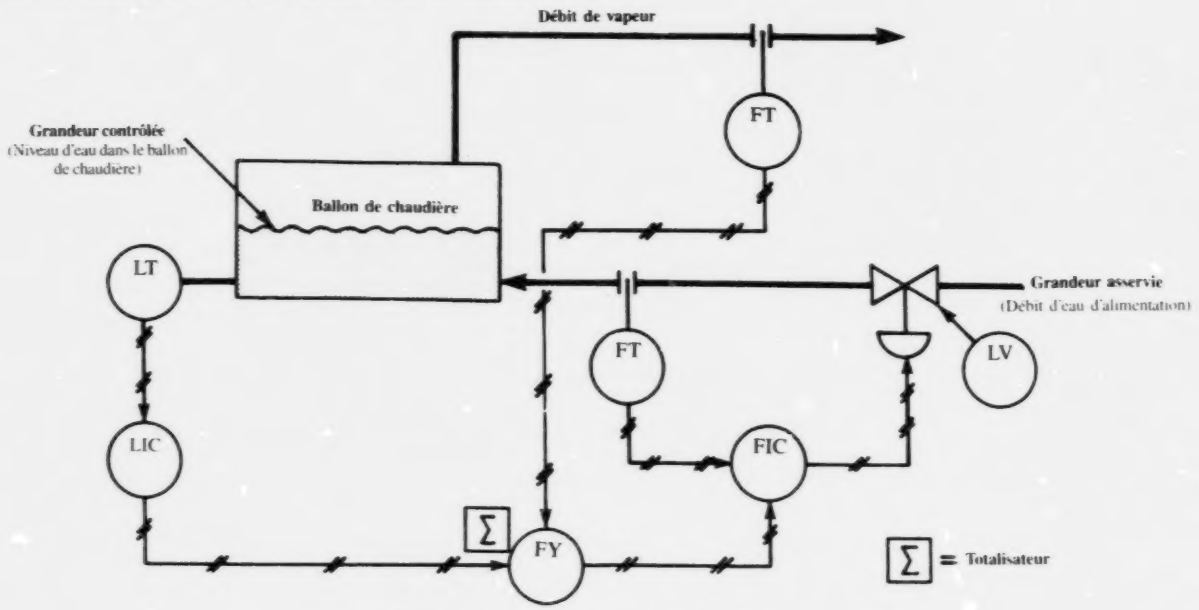
Selon ce mode de régulation, une perturbation (sortie de vapeur) est aussitôt perçue par le transmetteur de débit (FT) qui transmet une variation de signal, par l'intermédiaire d'un relais totalisateur, à la vanne de régulation de niveau (LV). Ainsi, la grandeur asservie reçoit un «élan» aussitôt que la perturbation se manifeste de sorte que le débit d'admission d'eau est environ égal au débit de sortie de vapeur. Il est fort probable que les deux débits ne se contrebalancent pas parfaitement, mais l'action correctrice du régulateur de niveau (LIC) peut supprimer l'écart de niveau du réservoir. Puisque le signal du transmetteur de débit sert à déterminer le signal de réglage initial transmis à la vanne de régulation de l'eau d'alimentation, il est souhaitable que la variation du signal d'admission règle le positionnement de la vanne de façon que le débit d'admission d'eau soit égal au débit de sortie de vapeur qui constitue la perturbation. C'est ici que le choix des caractéristiques appropriées de la vanne de réglage devient important. On peut améliorer davantage le rapport entre le signal de commande et l'ouverture de la vanne en munissant cette dernière d'un positionneur à cames. D'après les essais de mise en service, le positionneur peut alors être réglé de façon que toute variation du signal de débit de vapeur produise presque la même variation dans le débit d'eau d'alimentation de la vanne de régulation. Ce système est parfois appelé système de régulation d'eau d'alimentation à deux éléments.

La régulation de niveau dans les ballons de chaudière est une application courante de la régulation par anticipation à trois éléments. La mesure du niveau d'eau du ballon peut porter à confusion lorsque la demande en vapeur de la chaudière augmente ou diminue subitement. Lorsque la charge de vapeur augmente subitement, la pression dans le ballon diminue rapidement. Cette chute de pression provoque la formation de bulles dans les tubes de vaporisation placés sous le ballon. Il en résulte une indication de niveau élevé qui fausse la quantité d'eau contenue dans les tubes de vaporisation et le ballon: il s'agit de l'effet de «gonflement». Si l'on avait utilisé un mode de régulation ordinaire à élément unique, le débit d'eau dirigé vers la chaudière diminuerait du fait que le niveau d'eau semble élevé. Cette réponse serait fausse parce que suite à l'évacuation d'une grande quantité de vapeur, une plus grande quantité d'eau devrait être introduite dans le ballon. D'autre part, lorsque la charge de vapeur diminue subitement, la pression à l'intérieur du ballon augmente, ce qui crée un effet de «contraction» qui déclenche de nouveau une mauvaise réaction du système de régulation à élément unique.



Boucle de régulation par anticipation à deux éléments
Figure 19

Un système de régulation à trois éléments réglant le niveau du ballon de la chaudière élimine les problèmes déjà mentionnés d'un système à élément unique (figure 20). Les trois éléments sont le niveau d'eau du ballon, le débit de vapeur et le débit d'eau d'alimentation. Essentiellement, l'effet du régulateur de niveau est neutralisé pendant les périodes de «gonflement» ou de «contraction» qui faussent la mesure du niveau. À mesure que ces effets disparaissent, le régulateur de niveau règle la vanne de régulation d'eau d'alimentation pour corriger tout écart d'indication du niveau d'eau dans le ballon.



Régulation à trois éléments du niveau d'un ballon de chaudière
Figure 20

Régulation en cascade

La régulation en cascade est semblable à une boucle de régulation par anticipation à deux éléments dans laquelle deux mesures règlent une grandeur asservie. Cependant, dans le cas de la régulation en cascade, chaque mesure est transmise à un régulateur distinct et la sortie du régulateur primaire devient le point de consigne du deuxième régulateur (figure 21). Le régulateur primaire est associé à la grandeur contrôlée qui serait employée si on n'utilisait qu'une simple boucle d'asservissement. Cette méthode tend à diviser le processus et les temps de réponse en deux parties distinctes, ce qui améliore le fonctionnement du processus. Puisqu'on utilise deux régulateurs, il est important que la deuxième mesure soit choisie le plus judicieusement possible et que les deux régulateurs soient mis en service en série et d'une façon rigoureusement méthodique. La régulation en cascade sert également à compenser les temps de réponse du processus et de l'appareil de mesure de la grandeur contrôlée.

Importance de la connaissance du processus

Lorsque l'on envisage la régulation automatique, il est important de bien comprendre le processus en cause et de connaître ses réactions aux perturbations et à l'action correctrice des régulateurs. Pour déterminer le meilleur mode de régulation et choisir l'appareillage approprié, il faut connaître les réponses aux questions suivantes:

- Quelles grandeurs doivent être maintenues et quelle est la variation maximale admissible?
- Quelles perturbations peuvent survenir et quelle est l'amplitude des variations qu'elles provoquent?
- Y a-t-il un délai important entre le moment où survient une perturbation et le moment où elle se manifeste dans la grandeur contrôlée?
- De combien la grandeur contrôlée varie-t-elle pour une variation typique de la perturbation d'entrée?
- Y a-t-il une deuxième ou une troisième grandeur de processus sur lesquelles le système de régulation pourrait agir pour éliminer les temps de réponse du processus?
- Sachant qu'une grande gamme de mesure de la grandeur contrôlée n'est pas souhaitable, quelles seraient les portées supérieure et inférieure logiques de la mesure?
- Quelle est la gamme de réglage de la grandeur asservie et de l'élément de réglage final?

- Avec quelle précision peut-on prédire la perte de charge dans chaque vanne de régulation, dans des conditions de débits maximal et minimal?
- Quelles conditions du processus doivent être maintenues pour assurer la sécurité lors du démarrage, du fonctionnement et de l'arrêt du système?

Les questions qui précèdent sont loin d'épuiser la liste des informations utiles concernant le processus, mais elles constituent un bon point de départ. L'expérience d'autres utilisateurs du même processus peut aider à évaluer le meilleur mode de régulation automatique.

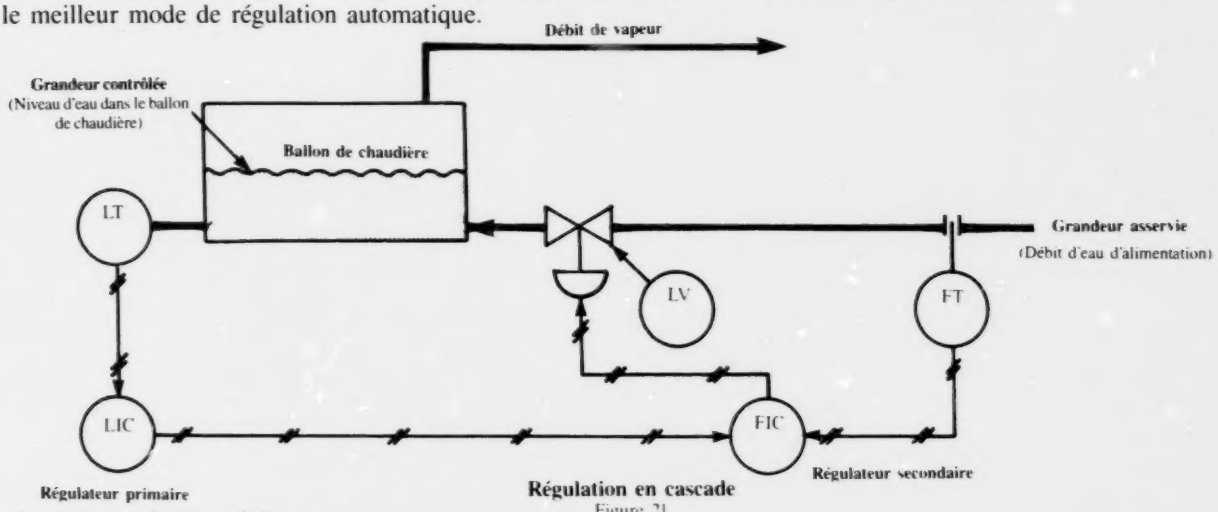


Figure 21

Analyse énergétique

Analyse au passage

L'*analyse au passage* consiste en une inspection visuelle des installations pour étudier la consommation de l'énergie. Dans la plupart des installations industrielles, bâtiments commerciaux et immeubles de caractère public, l'analyse au passage permet d'identifier les *possibilités de gestion de l'énergie*. L'importance de bien connaître le processus pour choisir adéquatement les modes de régulation automatique a déjà été soulignée. Ainsi, dans la plupart des cas, il faut bien étudier le processus avant d'en arriver à la conclusion qu'il est rentable d'y installer un système de régulation automatique. Une telle étude constitue la deuxième partie de l'analyse énergétique: l'analyse de diagnostic.

Analyse de diagnostic

Dans la plupart des cas, on ne peut justifier l'amélioration ou l'ajout d'un système de régulation automatique qu'après avoir étudié les besoins et les possibilités du processus, évalué les économies qu'on peut en tirer et estimé les coûts. Ce genre d'étude est appelé *analyse de diagnostic*.

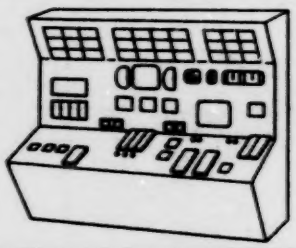
La *liste de contrôle* présentée à l'annexe D a été conçue pour faciliter cette étude. Puisque la régulation automatique s'applique à presque tous les processus, la liste de contrôle suggérée ne peut être que générale. Cependant, l'usage de cette liste augmentera les chances qu'elle soit adaptée et aboutisse à des résultats plus concluants.

Sommaire

Dans ce chapitre, les points suivants ont été traités:

- La mesure précise des grandeurs du processus est essentielle à l'efficacité de la régulation automatique.
- Il est indispensable de bien connaître le processus, y compris ce qui doit être réglé, la valeur de la ou des grandeurs contrôlées, l'analyse des perturbations et la gamme de toutes les grandeurs.
- Nombreux sont les types d'appareils de régulation et les méthodes pour les améliorer. Il peut s'avérer nécessaire de se faire conseiller dans le choix de la solution la plus rentable.
- Le choix et la capacité de l'élément de réglage final sont des facteurs très importants.
- La mise au point d'un système de régulation doit permettre assez de souplesse pour compenser les conditions et les variations imprévisibles du processus.
- Un système de régulation automatique peut améliorer l'uniformité et la qualité d'un processus et permettre au personnel de consacrer plus de temps à d'autres tâches, comme l'entretien.
- Les systèmes de régulation automatique réduisent les coûts d'exploitation.

APPAREILLAGE



Le présent chapitre décrit les combinaisons d'appareillage qui peuvent être employées pour assurer la régulation automatique des équipements et processus. L'objectif est d'obtenir la quantité et qualité optimum de produit au coût le plus bas, en employant la combinaison la plus rentable d'appareils de régulation automatique.

Appareillage de mesure

Une mesure précise des grandeurs est essentielle à la bonne régulation du processus. Le Module 15 — Mesures et contrôles doit servir de document de référence dans l'évaluation des techniques de mesure et des caractéristiques des appareils.

Régulateurs

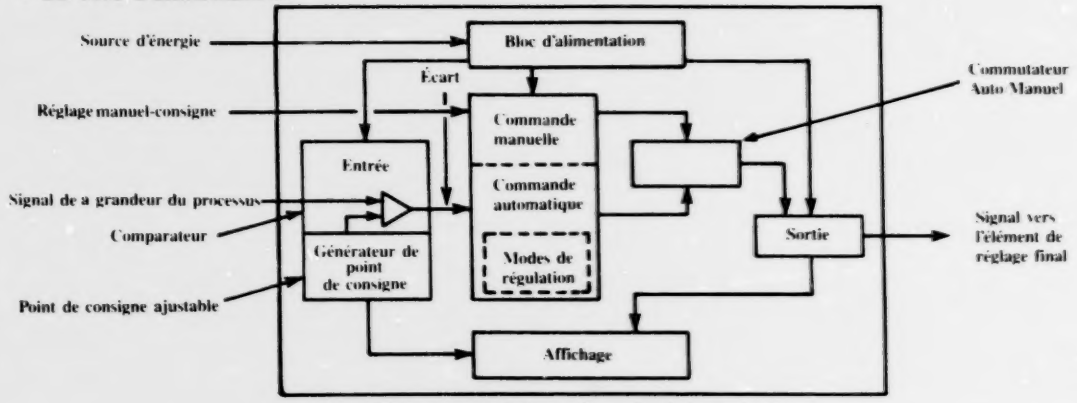
Dans la terminologie de la régulation automatique, un régulateur est un dispositif dont la sortie peut être modifiée pour maintenir une grandeur contrôlée à une valeur prescrite ou à l'intérieur de limites précises, ou modifier la grandeur du processus d'une façon déterminée.

La plupart des processus exigent que certaines grandeurs telles que le débit, la température, le niveau et la pression, se maintiennent le plus près possible d'une valeur de référence, soit le point de consigne. Le dispositif servant à maintenir une grandeur de processus au point de consigne désiré est un régulateur. Le régulateur perçoit un signal représentant la valeur réelle de la grandeur du processus, compare ce signal au point de consigne, et agit sur le processus pour minimiser l'écart entre les deux. Le régulateur a deux entrées: la grandeur mesurée et le point de consigne. Le point de consigne peut également être interne.

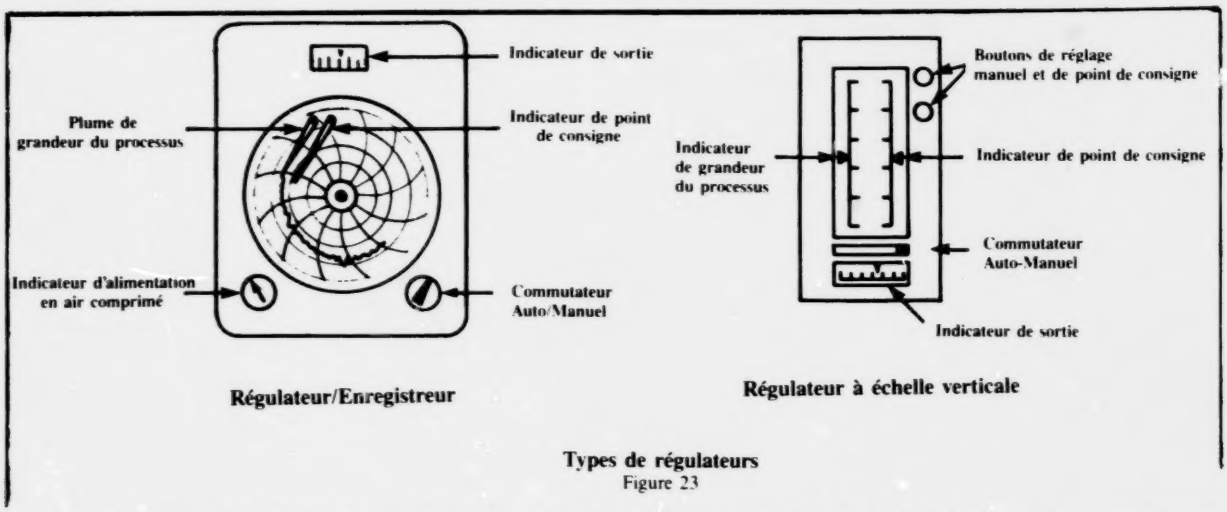
Les divers modes de régulation soit, proportionnelle, proportionnelle et intégrale, et proportionnelle, intégrale et dérivée sont décrits dans le chapitre sur les notions de base. Ces modes de régulation s'appliquent en intégrant des dispositifs ou des circuits supplémentaires dans le régulateur.

Les fonctions internes d'un régulateur se rattachent à six composants principaux (figure 22).

- Le module d'entrée qui reçoit le signal de la grandeur mesurée et du point de consigne.
- Le comparateur qui détermine l'écart ou l'erreur entre la grandeur mesurée et le point de consigne.
- Le module de commande qui génère les signaux de commande automatique ou manuelle d'après la nature de l'écart et le mode de commande choisi.
- Le module d'affichage qui indique l'état des signaux importants.
- Le commutateur automatique-manuel.
- Le bloc d'alimentation.



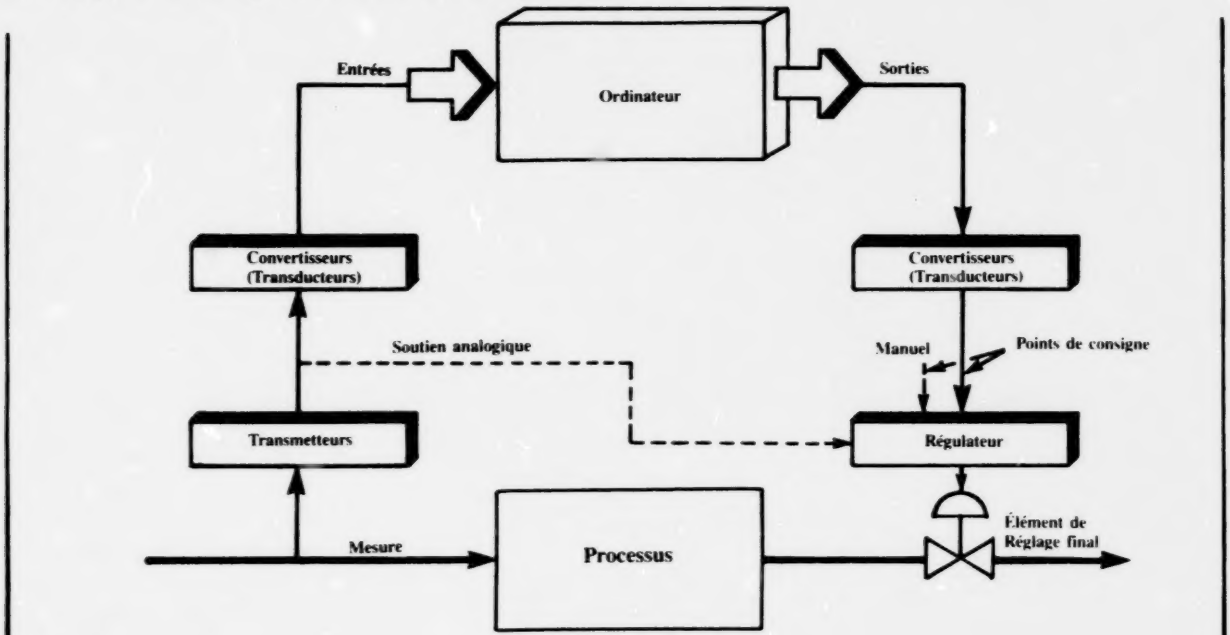
Composants de base d'un régulateur
Figure 22



Types de régulateurs
Figure 23

Les composants facilement reconnaissables sur un régulateur sont le module d'affichage, le commutateur automatique-manuel et les boutons de réglage du point de consigne et du fonctionnement manuel (figure 23). Le commutateur automatique-manuel permet au régulateur de fonctionner soit en mode manuel, soit en mode automatique. C'est sa capacité de fonctionner automatiquement qui justifie l'emploi d'un régulateur, car il peut alors comparer lui-même le signal de la grandeur mesurée avec le point de consigne et modifier son signal de sortie de façon à réduire ou éliminer l'écart.

Le module d'affichage renseigne sur le point de consigne, la grandeur du processus et la sortie du régulateur. Ces trois éléments d'information permettent de juger si le déroulement du processus est acceptable ou s'il faut le modifier. La plupart des grandes marques de régulateurs présentent des caractéristiques semblables, bien que de grandes différences existent dans leur mode d'affichage et la façon dont la commutation se fait entre le mode automatique et le mode manuel. La plupart des régulateurs peuvent accepter un autre signal d'entrée afin que leur point de consigne soit modifié par un dispositif extérieur. Le régulateur à point de consigne télécommandé est employé dans les systèmes de régulation automatique plus complexes, allant des boucles en cascade jusqu'aux systèmes dont le point de consigne est calculé par ordinateur.



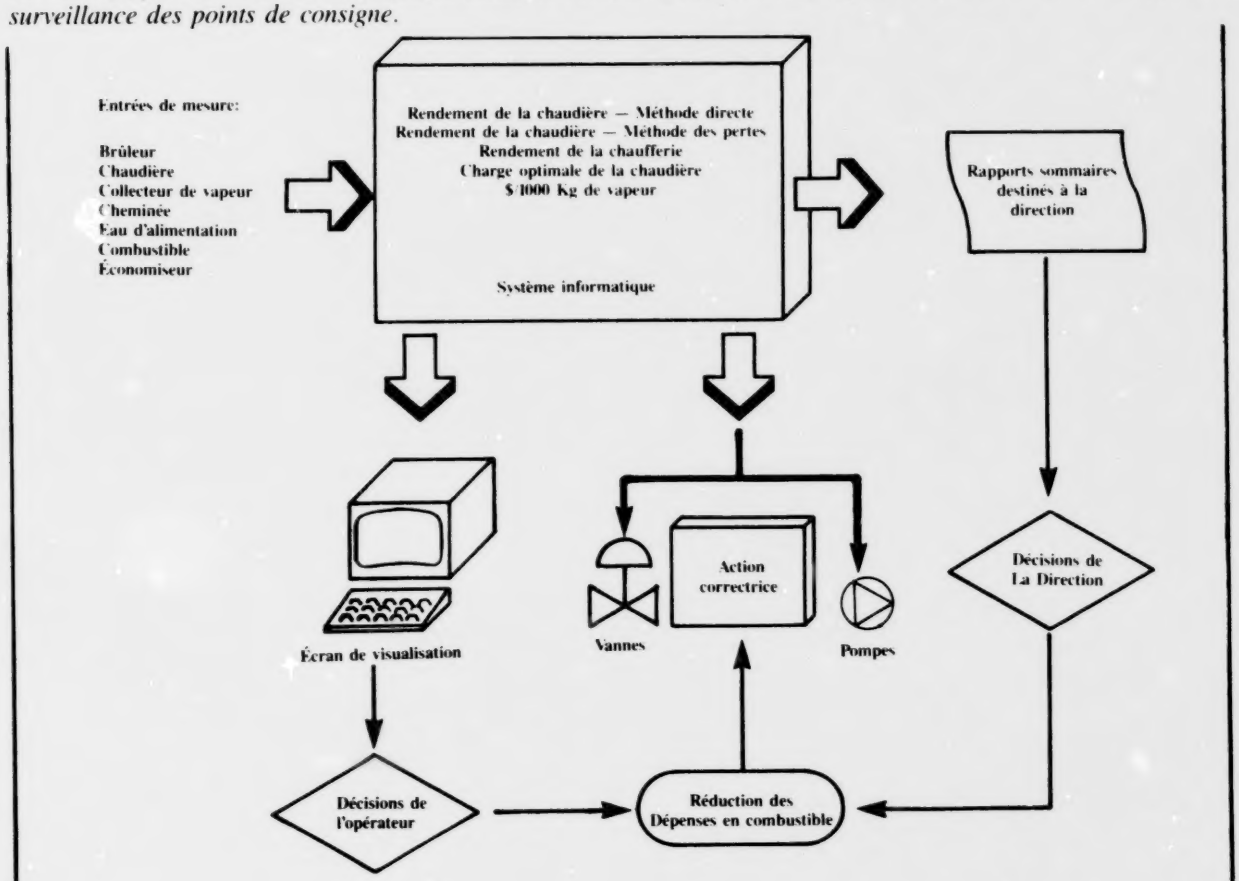
Ordinateur industriel de surveillance des points de consigne
Figure 24

Ordinateurs

Les calculateurs analogiques pneumatiques servent aux fins de régulation depuis la fin des années 40. Ils exécutent les divers calculs d'addition, de soustraction, de multiplication et de division à l'aide de signaux analogiques mis en opposition dans des appareils à déplacement différentiel. Ce genre d'appareil est employé surtout pour des calculs spécialisés, tels que le calcul du débit-masse de gaz à partir des mesures de débit, de température et de pression statique, ainsi que le calcul du flux thermique à partir du débit d'un liquide et du différentiel de température. L'usage de certains calculateurs électroniques pouvant effectuer des calculs analogiques est maintenant très répandu.

Le terme ordinateur se rapporte généralement au calculateur numérique mis au point au cours des vingt dernières années. Les premiers calculateurs numériques sont nés de l'industrie électronique du tube à vide et furent mis au point principalement pour les domaines de l'ingénierie et des sciences au milieu des années 40. Plus tard, ces calculateurs numériques furent appliqués au domaine de la gestion et de la comptabilité pour le traitement électronique des données. L'application des ordinateurs dans le domaine de la régulation automatique commença à se répandre de 1960 à 1970 et, de nos jours, on compte par milliers les ordinateurs utilisés à cette fin dans le monde entier.

Les premiers calculateurs industriels étaient limités à des fonctions de surveillance (figure 24). Des mesures fournissaient à l'ordinateur les données à partir desquelles il calculait les meilleures conditions de service. Plus tard, les résultats des calculs servirent à régler les points de consigne des régulateurs analogiques pneumatiques ou électroniques (figure 25). Ces régulateurs déterminaient alors le signal à envoyer à la vanne de régulation ou à l'élément de réglage final pour modifier les conditions de service du processus afin d'assurer une exploitation optimale. L'ordinateur «captait» et comparait les modifications survenues dans le processus, tout comme un humain l'aurait fait, puis commandait des réglages selon les besoins. Cette forme de régulation par ordinateur est appelée *surveillance des points de consigne*.



Système de gestion de l'énergie pour le contrôle du rendement des chaudières
Figure 25

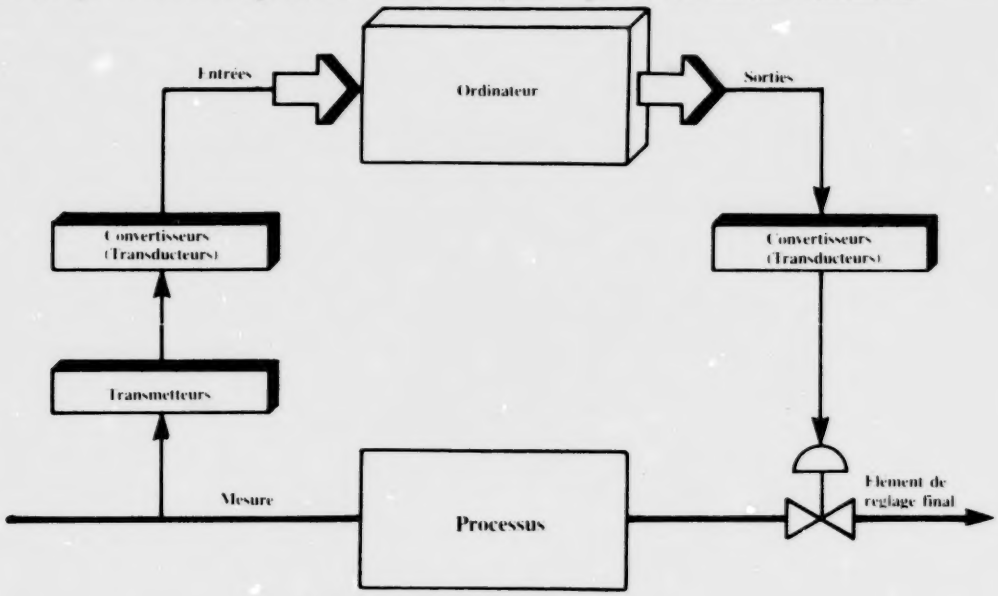
À mesure que les ordinateurs devinrent plus fiables, plus rapides, mieux compris et moins coûteux, le calculateur numérique se mit à commander directement l'élément de réglage final (figure 26) au lieu de seulement modifier le point de consigne d'un régulateur analogique classique. Cette forme de régulation par ordinateur est appelée *régulation numérique*.

La surveillance des points de consigne et la régulation numérique exigent un appareillage de soutien, souvent constitué par des régulateurs analogiques pneumatiques ou électroniques. Le soutien pneumatique offre des avantages de simplicité et de coût, alors que le soutien électronique offre l'avantage de la compatibilité avec les signaux d'entrée et de sortie de l'ordinateur.

Suite aux progrès fantastiques des dix dernières années, les mini-ordinateurs des années 70 sont aujourd'hui dépassés. Grâce à l'évolution de la technologie passant du mini-ordinateur au micro-ordinateur puis au microprocesseur, une foule de moyens de régulation ou d'automatisation des processus sont devenus plus économiques et plus faciles à appliquer.

Un ordinateur qui intervient dans la marche d'un processus est ce qu'on appelle un «ordinateur industriel». Il fonctionne généralement «en temps réel» par opposition au fonctionnement «en temps partagé» souvent associé aux ordinateurs de traitement des données. L'expression *en temps réel* signifie qu'à tout instant du fonctionnement du processus, les signaux d'entrée des grandeurs du processus sont continuellement surveillés par l'ordinateur. L'expression *en direct* est souvent utilisée pour indiquer qu'un ordinateur est effectivement en train de surveiller ou de régulariser un processus ou une opération. Ces deux termes s'emploient indifféremment pour qualifier un ordinateur industriel, puisqu'il doit être continuellement raccordé en direct pour recevoir les signaux d'entrée.

Une des justifications les plus fréquentes de la régulation par ordinateur est la gestion de l'énergie. De nombreuses industries sont d'importantes consommatrices d'énergie, que ce soit d'origine thermique, électrique ou mécanique. Ces industries achètent plusieurs types de combustible qu'elles convertissent, par exemple en vapeur produite par des chaudières de grande puissance. Les rejets des processus sont souvent reconvertis en énergie au moyen de la combustion. La vapeur sert à répondre aux besoins en énergie thermique d'une installation, et parfois aussi à fournir la force motrice qui entraîne des génératrices à turbine pour la production interne d'électricité.



Ordinateur industriel de régulation numérique
Figure 26

L'emploi de systèmes de régulation à base de microprocesseur pour des processus tels que les chaudières est assez répandu de nos jours. Généralement, leur conception modulaire permet de les adapter «sur mesure» à la taille et à la nature de l'installation à régler. Des transmetteurs électroniques standards les renseignent sur le comportement du processus. Pour la régulation d'une chaudière, les caractéristiques suivantes sont couramment employées:

- La régulation de la combustion incluant la correction automatique de l'excès d'air pour assurer un rendement optimal.
- La régulation à éléments multiples de l'eau d'alimentation.

- La régulation logique séquentielle du système de sécurité des brûleurs.
- Le calcul du rendement des chaudières individuelles et de l'ensemble de la chaufferie, pour déterminer la charge la plus efficace des chaudières et alerter le personnel en cas de conditions susceptibles de nuire au rendement énergétique de l'équipement.
- La production de rapports périodiques à la fin de chaque heure de marche, quart de travail, jour, semaine ou mois.
- Le déclenchement d'alarmes sonores et l'impression automatique de rapports lorsqu'une grandeur atteint un seuil d'alarme et quand elle retourne à la normale.
- Un affichage graphique sur écran cathodique, pour représenter visuellement l'état du système ou d'un sous-système et pour fournir une analyse de tendance des points sélectionnés à partir des données gardées en mémoire.
- Un tel système de régulation de chaudières pourrait également régler toutes les formes d'énergie achetées telles que le gaz naturel, l'électricité, le mazout et le charbon, ainsi que toutes autres formes d'énergie produites à l'intérieur de l'usine par des génératrices à turbine ou des chaudières de récupération de chaleur. De plus, la consommation d'énergie des appareils pourrait être mesurée et les signaux transmis à l'ordinateur de gestion de l'énergie pour être emmagasinés et relevés. Lorsqu'on introduit dans l'ordinateur les données relatives à la quantité d'énergie consommée et produite, l'étude énergétique d'un service, d'une ligne de production, d'une installation ou d'un bâtiment peut être faite automatiquement.

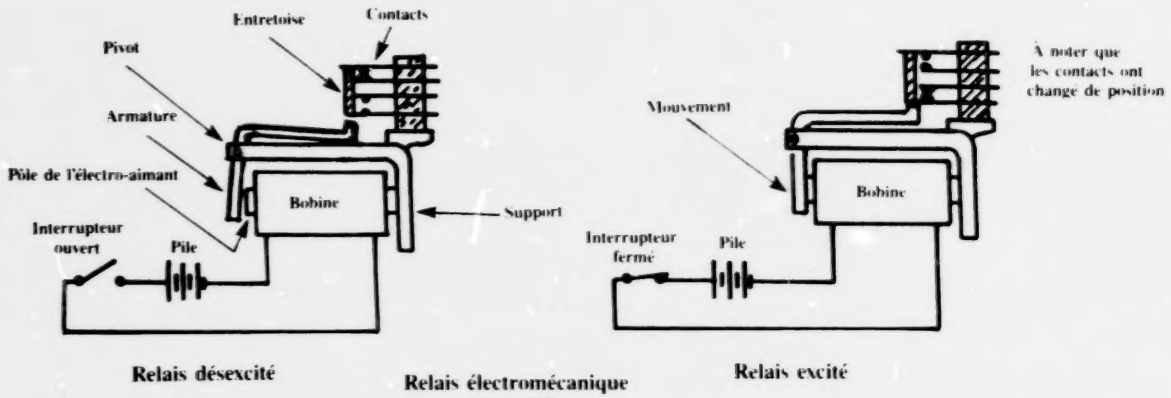


Figure 27

Composants logiques

Les composants logiques sont des dispositifs qui, par leur interconnexion, remplissent les fonctions de commutation du processus. Les composants peuvent être à commande pneumatique ou électrique, cette deuxième catégorie regroupant les dispositifs électromécaniques et électroniques qui n'ont pas de pièces mobiles. Les composants logiques peuvent donc être divisés en deux groupes, soit les composants avec pièces mobiles ou sans pièce mobile.

Les composants logiques avec pièces mobiles comprennent les éléments tels que les relais électromécaniques, les minuteries et les commutateurs à gradins à étages. Ils ont tous quelque chose en commun en ce sens qu'ils ouvrent ou ferment un ou plusieurs contacts électriques en fonction du temps ou opère un changement de condition électrique suite à un signal. Les contacts sont raccordés de façon à mettre en route ou arrêter certains appareils tels que pompes et autres équipements mus par moteur ou des dispositifs de signalisation.

Les relais décrits ici sont tous du type électromécanique ou électrothermique et ils se présentent sous des formes très diverses. Les relais de mesure et les relais ultrasensibles sont actionnés par des signaux à faible énergie (quelques milliwatts ou même microwatts), et on les emploie lorsque le signal est très faible comme à la sortie d'un transducteur. On emploie des relais de service général ou de petits relais de commande lorsque la souplesse et la fiabilité sont essentielles. Les relais de cette catégorie peuvent être soit à courant alternatif ou continu, et leur intensité peut aller jusqu'à 20 ampères par contact sous une tension de 120 volts.

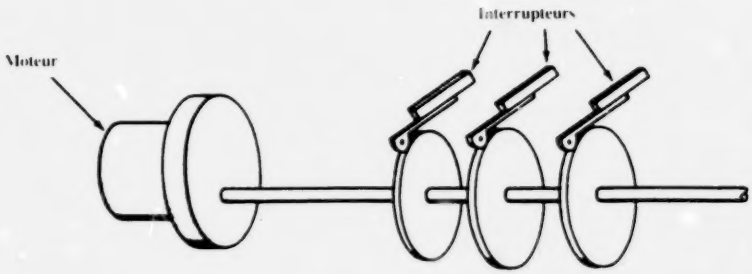
Les relais de plus grandes dimensions sont employés pour la commutation d'alimentation électrique et sont souvent asservis à un courant alternatif provenant de petits relais de service général. Tous les relais fonctionnent selon le même principe des forces électromagnétiques. Ces forces sont produites par un courant électrique circulant dans une bobine placée autour d'une pièce ayant des pôles qui attirent une armature. Les états de désexcitation et d'excitation d'un relais sont représentés dans la figure 27. Dans les relais de mesure, la bobine elle-même se déplace dans un champ magnétique.

Les minuteries sont des dispositifs qui amorcent une action dans un circuit électrique à un moment prédéterminé. Les minuteries peuvent être du type mécanique, avec manoeuvre pneumatique, hydraulique, à mouvement d'horlogerie ou à moteur électrique, ou du type électronique ou thermique.

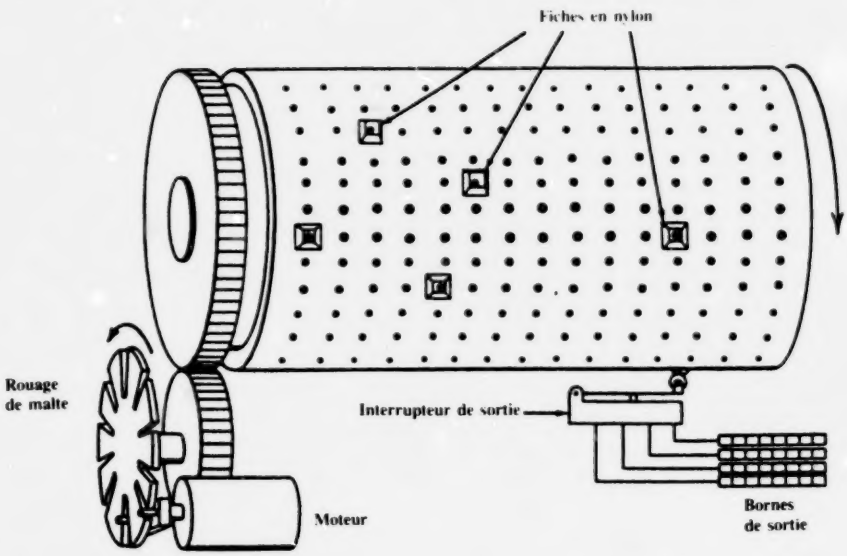
La fonction d'un minuterie est d'amorcer une action après un laps de temps déterminé. Cette action peut mettre en marche plusieurs circuits dans un ordre déterminé et suivant les délais précis pour déclencher des réactions ou des processus à des intervalles définis.

Lorsqu'un intervalle de temps simple (fixe ou réglable) doit être établi, on a recours à des compteurs d'intervalle. Ces dispositifs emploient un mouvement d'horlogerie, un moteur synchrone, un amortisseur étalonné ou d'autres moyens pour déclencher une certaine action au bout d'un intervalle précis après réception du signal par le compteur. La gamme des intervalles varie de quelques millisecondes à une heure dans le cas des compteurs d'intervalles pneumatiques, et jusqu'à plusieurs jours pour ceux qui sont commandés par moteur électrique synchrone.

Les programmateurs peuvent commander plusieurs circuits de façon continue lorsque plusieurs actions différentes sont nécessaires pendant le cycle (figure 28). Ils sont employés depuis nombre d'années pour commander des actions telles que la marche séquentielle d'une enseigne publicitaire au néon, le mélange d'ingrédients et la cuisson dans les brasseries. La combinaison programmateur-relais est à la base de la plupart des opérations séquentielles par lots commandées automatiquement.

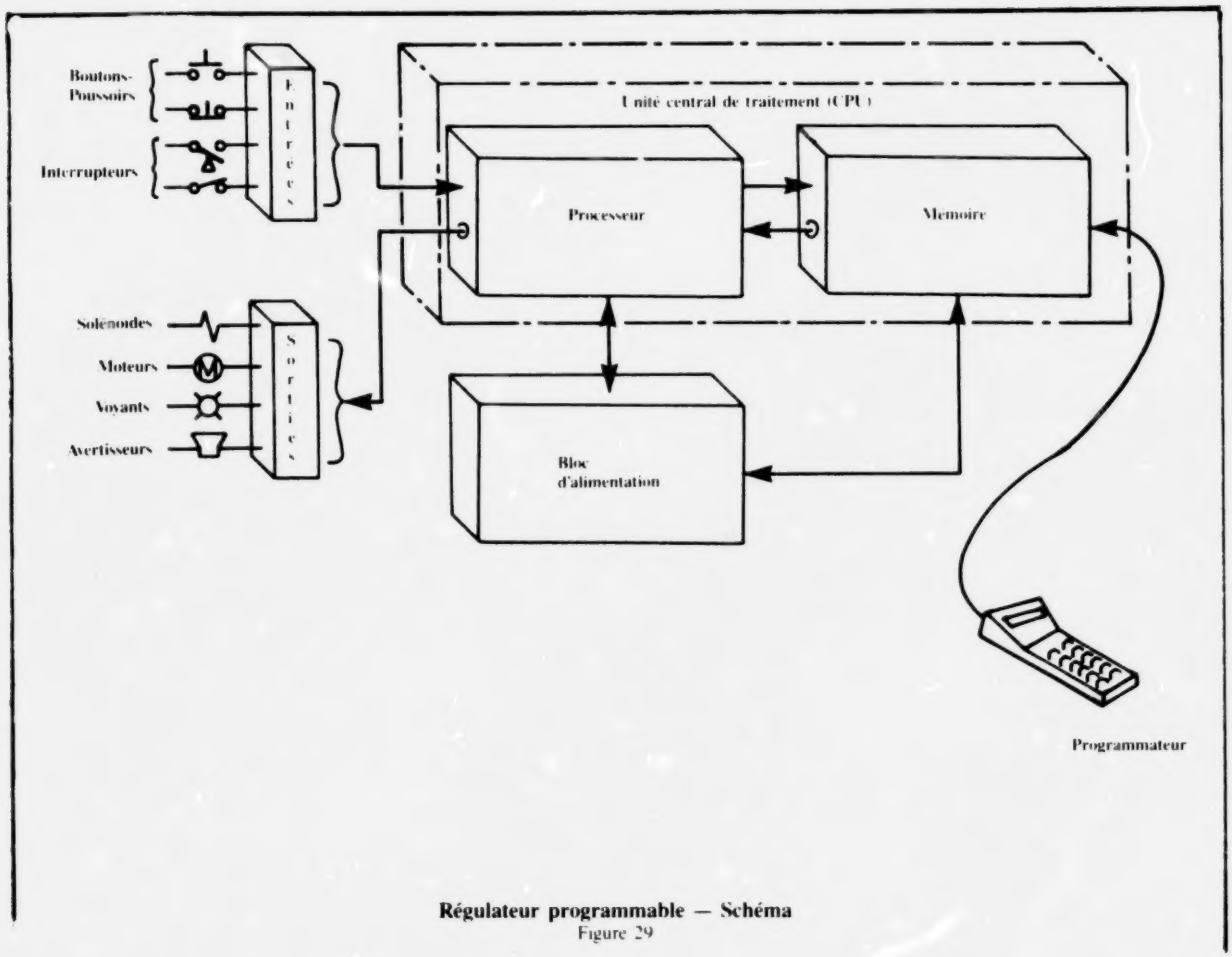


Minuterie à cames (simplifié)



Tambour programmable pour le déclenchement séquentiel d'évènement(s)

Programmateurs
Figure 28



Régulateur programmable — Schéma
Figure 29

Régulateurs programmables

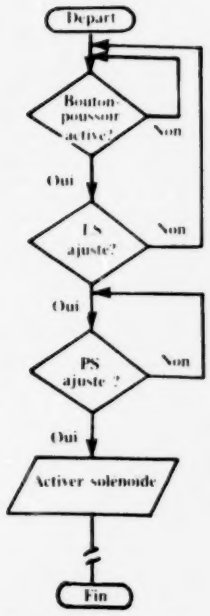
L'industrie automobile a longtemps employé tout un assortiment de relais, de minuteries, de commutateurs à gradins et de programmateurs qui demandaient, pour tous les changements annuels de modèles, un travail considérable de relocalisation et de câblage. A la fin des années 60, l'intérêt qu'a pris le marché à l'appareillage électronique programmable en remplacement des autres types de composants logiques a abouti à la mise au point du régulateur programmable (PC). Aujourd'hui, quelques 150 constructeurs offrent ce genre d'appareil, parfois appelé régulateur logique programmable.

Les premiers régulateurs programmables n'étaient fondamentalement que des substituts de minuteries et de relais électromécaniques. Ces nouveaux appareils coûtaient plus cher, mais leur justification venait de leur coût d'installation plus faible, de leur plus grande souplesse d'application et de leur potentiel de réutilisation. Ces avantages sont accrus aujourd'hui du fait que leur prix baisse. Cependant, si l'usage de ces appareils est très répandu de nos jours, c'est surtout grâce à la souplesse de changement de la logique d'un système, à la rapidité d'implantation de ces changements et à leur réutilisation dans d'autres applications.

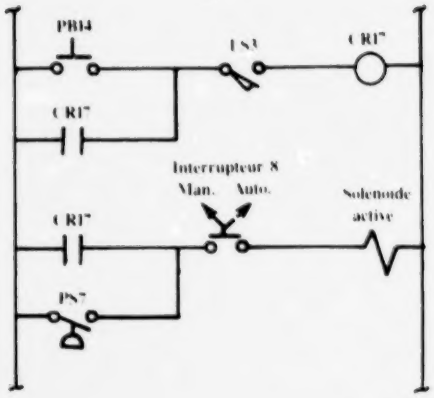
Un régulateur programmable est un appareil à semi-conducteurs qui commande une machine ou un processus grâce à un programme stocké en mémoire et une rétroaction provenant des dispositifs d'entrée et de sortie (figure 29). Un PC comprend trois sections de base: l'*unité centrale de traitement*, l'*interface d'entrée/sortie*, et le *bloc d'alimentation*. La programmation n'est pas difficile si l'on connaît la logique des relais classiques. Contrairement à l'ordinateur dont la programmation s'effectue à l'aide d'un langage spécial tel que BASIC, FORTRAN ou PASCAL, le régulateur programmable fonctionne selon un diagramme en échelle, méthode semblable à celle employée dans les circuits des relais et des minuteries.

Avant d'écrire et d'introduire un programme de régulateur programmable, on doit exécuter les étapes suivantes:

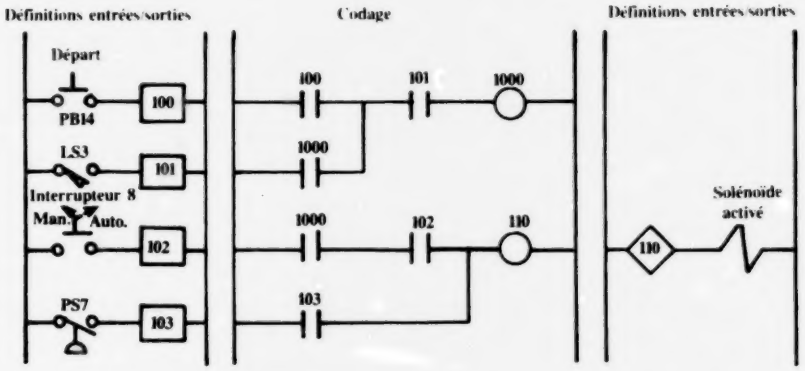
1. Définir la tâche de commande en décrivant simplement la séquence des opérations.
2. Dessiner un organigramme représentant les séquences et les relations entre les composants et les activités.
3. Concevoir des diagrammes logiques en échelle.
4. Affecter des codes d'identification à chaque signal d'entrée et de sortie.
5. Affecter des adresses au régulateur programmable pour chaque signal d'entrée et de sortie.
6. Concevoir un diagramme logique codé selon un diagramme en échelle en y ajoutant les adresses et autres formes d'identification.



Par ordinagramme



Par diagramme en échelle



Par logigramme

Modes de représentation de la logique interne d'un régulateur programmable
Figure 30

A ce stade, le programme est prêt à être introduit dans le régulateur programmable au moyen du programmateur. Le succès et la rapidité de la vérification dépend du soin qu'on a apporté aux étapes précédentes. Des exemples typiques d'un organigramme, d'un diagramme en échelle et d'un diagramme logique codé sont présentés dans la figure 30.

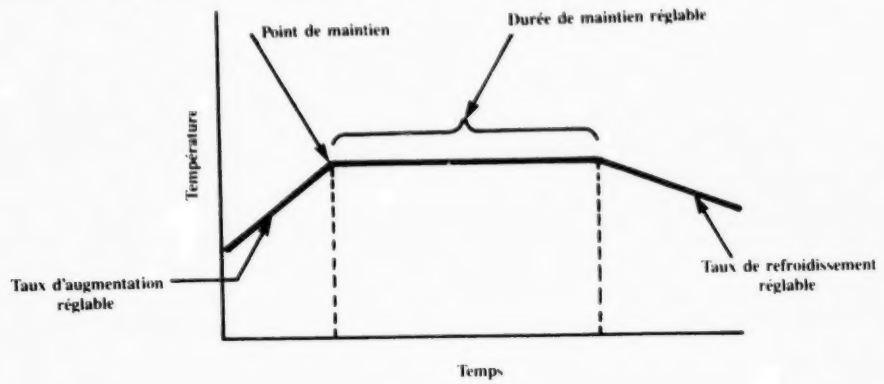
Un régulateur programmable présente, par rapport aux composants logiques, les avantages suivants:

- Une construction modulaire permettant d'élargir ses capacités à mesure que les besoins du système augmentent.
- Une souplesse d'adaptation facilitant et accélérant la modification de ses programmes, souvent sans l'ajout de composants supplémentaires.
- Une facilité d'installation grâce à sa taille relativement petite et à sa construction modulaire. Les interfaces d'entrée/sortie peuvent être montées dans une zone distincte de l'unité centrale de traitement pour réduire le câblage local.
- Un entretien réduit au minimum, grâce à l'emploi de dispositifs enfichables et à sa conception transistorisée. Beaucoup de régulateurs programmables comportent un dispositif d'auto-diagnostic indiquant la nature des défectuosités.

L'unité centrale de traitement reçoit (lit) des données d'entrée à partir de dispositifs discrets tels que boutons-poussoirs, interrupteurs, interrupteurs de niveau ou de pression, et exécute le programme de marche enregistré. Les commandes de sortie appropriés sont envoyés aux dispositifs de commande tels qu'électrovannes, moteurs, voyants et avertisseurs. Le bloc d'alimentation fournit toutes les tensions électriques nécessaires au bon fonctionnement du système.

L'interface d'entrée/sortie est le lien entre l'unité centrale et les équipements ou processus à contrôler, ceux-ci fonctionnant généralement à des tensions électriques plus élevées que l'unité centrale et son bloc d'alimentation.

Pour qu'un régulateur programmable puisse fonctionner, un programmateur doit introduire le programme de commande en mémoire. Le programmateur le plus simple est semblable à une calculatrice manuelle qu'on raccorde par un câble à l'unité centrale; les programmateurs les plus perfectionnés emploient un écran cathodique et des circuits à base de microprocesseur fournissant l'«intelligence» pour l'entrée d'un programme plus complexe.



Programme d'un générateur de fonctions
Figure 31

Générateurs de fonctions et dispositifs de calculs

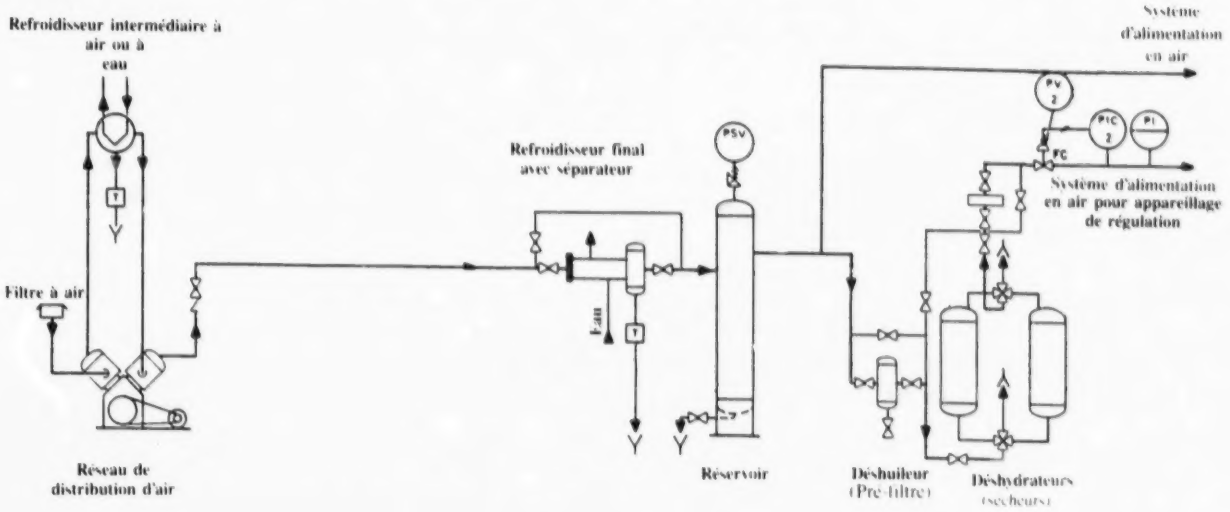
Le plus simple et le moins coûteux des générateurs de fonctions temporelles analogiques est un programmateur du type à cames dans lequel une came entraînée par moteur modifie le point de consigne du régulateur. Ces dispositifs sont généralement installés dans un gros boîtier muni d'un diagramme circulaire de 300 mm qui enregistre la grandeur mesurée. Souvent, les programmateurs à cames sont appliqués à des processus de chauffage ou de refroidissement à régulation par lots.

Un programmateur de rampe et de maintien réglable combine un programmateur à cames et certaines minuteries réglables servant à définir les périodes de «maintien» ou de «taux d'élévation» de la température. Un programme type réglant le taux d'élévation, le temps de maintien et le taux de refroidissement est montré dans la figure 31. Ce type de générateur de fonctions est souvent appliqué à des processus de cuisson dans lesquels le taux d'élévation de la température du produit est important.

Les relais de calcul sont des dispositifs analogiques qui peuvent exécuter une variété de fonctions. De type électronique ou pneumatique, ils peuvent réaliser les fonctions types suivantes:

- Multiplication $A \times B = C$
- Division $A / B = D$
- Addition $A + B = E$
- Soustraction $A - B = F$
- Moyenne $(A + B + C + D) / 4 = G$
- Extraction de racine carrée, intégration et caractérisation

Les générateurs de fonctions et les relais de calcul sont diversifiés et très répandus car au cours des années des modèles spécialisés ont été progressivement mis au point pour répondre aux besoins du marché.



Système d'alimentation en air
Figure 32

Blocs d'alimentation

Tous les appareils requièrent une certaine forme d'énergie. L'appareillage de régulation pneumatique exige de l'air comprimé propre et exempt de particules d'huile et d'eau, alors que l'appareillage électronique nécessite un système d'alimentation électrique fiable.

L'air d'alimentation (figure 32) est souvent tiré du réseau principal d'air comprimé, en amont du réservoir principal, et il est transmis sous une pression d'environ 700 kPa (eff.). Un déshydrateur à adsorption assèche l'air jusqu'à un point de rosée de $-40°C$ et un filtre complémentaire empêche les particules de l'agent déshydrateur de pénétrer dans le collecteur de distribution. Ce dernier est généralement un tuyau galvanisé NPS 2 de conception «annulaire» équipé sur le dessus des divers raccords de prélèvement individuels. Tous les points bas sont munis de purgeurs permettant l'évacuation de condensation. En amont des appareils d'air ou des éléments de réglage final, un filtre à air/régulateur sert d'une part à ramasser les impuretés contenues dans l'air comprimé qui risqueraient d'obstruer les petits orifices, et d'autre part à réduire la pression à une pression de service d'environ 140 kPa (eff.).

Un des problèmes les plus courants de la régulation automatique est la mauvaise qualité de l'air en raison du montage incorrect ou du mauvais entretien du système d'alimentation en air. Les pertes provenant de fuites d'air peuvent être considérables.

La source d'alimentation électrique doit être fiable. En cas de panne de courant, il faut prévoir une commutation automatique sur une autre source. De nos jours, la plupart des appareils fonctionnent sous une tension standard de 117 V, 60 Hz. Pour les ordinateurs ou les appareils comportant un microprocesseur, une interruption momentanée de courant peut provoquer la perte de signaux de commande et, parfois, de données. Un système d'alimentation de secours du type 'non interruptible' élimine ce problème, et est souvent spécifié comme élément essentiel de l'opération par les fournisseurs d'appareillage. Des blocs de secours préassemblés sont disponibles auprès de l'industrie du matériel de distribution électrique. En général, les appareils de régulation automatique ne sont pas de gros consommateurs d'énergie.

Panneaux de commande

Un panneau de commande centralise tout l'appareillage de commande nécessaire à la marche sûre et efficace de l'installation. Les appareils faisant généralement partie d'un panneau de commande sont les enregistreurs, les régulateurs, les indicateurs, les avertisseurs d'alarme, les boutons-poussoirs, les commutateurs et les voyants.

Les modèles de panneaux de commande sont variés (figure 33) et sont choisis en fonction de facteurs tels que l'espace disponible, le besoin d'un affichage graphique et le nombre d'appareils de régulation et de commande. Le panneau à face verticale allant du plancher au plafond est le modèle le plus économique et le plus répandu. Le panneau à sections inclinées procure une meilleure visibilité à un opérateur debout, alors que la console et le pupitre de commande offrent un plan de travail abaissé qui convient à un opérateur assis. Les panneaux de commande sont presque toujours conçus spécifiquement d'après leurs applications particulières.

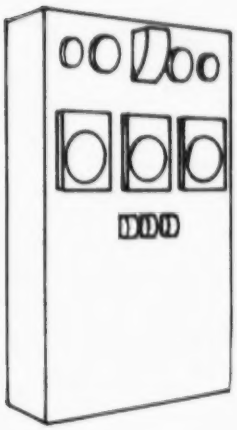
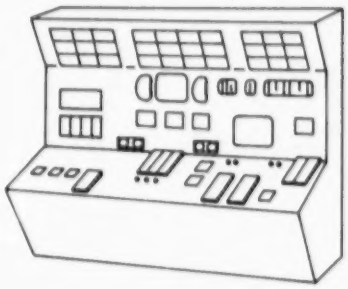
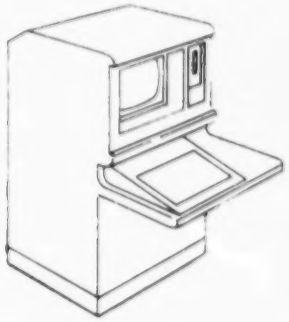


Tableau vertical



Panneau à section inclinée



Pupitre de commande

Panneaux de commande
Figure 33

Éléments de réglage final

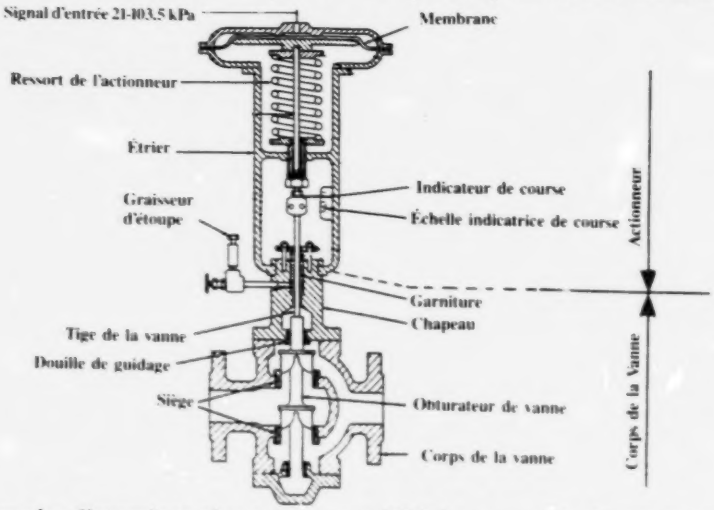
Vannes de régulation

Afin de mieux comprendre les vannes de régulation, voici quelques définitions:

- Une *vanne* est un dispositif dissipateur de pression conçu pour modifier le débit du fluide circulant dans une conduite.
- Une *vanne de régulation* est une vanne asservie à un actionneur. Elle règle le débit en réponse à un signal extérieur.
- Un *régulateur autonome* est une vanne de régulation dont le mécanisme interne fournit la force motrice nécessaire à son fonctionnement, sans recourir à une source extérieure pour le signal de commande et d'alimentation.
- Une *vanne manuelle* est un robinet manoeuvrable à la main à l'aide d'un levier ou d'une poignée.
- Un *actionneur* est un dispositif monté sur le corps d'une vanne. Il positionne cette dernière d'après le signal émis à distance.
- Le *corps de vanne* est la partie de la vanne contenant le fluide en circulation et l'obturateur qui en modifie le débit.

Une vanne de régulation comprend deux sous-ensembles principaux, soit le corps de vanne et l'actionneur (figure 34). Le corps de vanne, qui reçoit le fluide, est composé du corps proprement dit, d'un obturateur, de bagues de siège annulaires et de guides. Le chapeau et la tige de la vanne font également partie du corps de vanne. Ce sous-ensemble doit convenir à toutes les caractéristiques de pression, de température et de corrosion du processus. La garniture interne (obturateur, sièges annulaires et guides) règle la circulation du fluide, fournit le coefficient de débit et assure l'arrêt de sécurité. L'actionneur déplace l'obturateur en réponse à un signal (généralement pneumatique) transmis par un appareil de régulation.

Le type de corps le plus courant est celui à soupape. Il peut être à un ou deux sièges, guidé par cage ou par tige. Les vannes à un siège sont généralement employées lorsqu'une fermeture étanche est nécessaire, ou dans les petites dimensions de NPS 1 et au-dessous. Les vannes à soupapes à deux sièges sont souvent employées comme détendeurs de pression lorsque l'étanchéité à la fermeture est sans intérêt particulier. Les vannes à soupape guidées par cage sont probablement le modèle de corps et de garniture de vanne le plus répandu du fait que leur souplesse de réponse au débit est supérieure aux vannes guidées par tige. Dans les vannes à cage, la forme des sections de passage est souvent spécialement dessinée pour augmenter la capacité pour une dimension donnée et des pièces de garniture interne spéciales peuvent être posées pour réduire les bruits de fonctionnement.



Vanne de régulation
Figure 34

Dans les dimensions plus grandes que NPS 3, on emploie des vannes à papillon plus abordables que les vannes à soupape. Quoique la vanne à papillon ait une moins grande marge de réglage théorique que la vanne à soupape, elle présente de bonnes qualités de réglage du débit à des pressions différentielles peu élevées. Par contre, son usage est limité par sa tendance à l'engorgement et à la cavitation ainsi que par son fonctionnement bruyant. La cavitation est un phénomène qui se produit en deux phases: dans la première, il se forme des bulles de vapeur à l'intérieur du liquide, et dans la deuxième, ces bulles implosent dans la phase tout liquide. On doit tenir compte de ce phénomène lors de la sélection d'une vanne car il limite la durée de vie de l'appareil.

La vanne à tournant excentrique, vanne rotative munie d'un obturateur en forme de champignon, est un bon choix comparativement à la vanne à soupape. Pour une dimension donnée, ce type de vanne a une capacité de débit supérieure à la vanne à soupape et moindre que la vanne à papillon, bien qu'elle coûte moins cher que la vanne à soupape et plus cher que la vanne papillon. Souvent, une vanne à tournant excentrique est sans bride et peut être fixée directement entre deux brides de tuyauterie.

Pour une dimension donnée, les vannes à tournant sphérique offrent une grande capacité de débit et ne perturbent pratiquement pas l'écoulement du fluide. Elles conviennent donc au processus manipulant des matières fibreuses ou des boues du fait que la matière transportée risque peu de s'accumuler dans les cavités et autour des arbres. La marge de réglage théorique de cette vanne est limitée, mais peut être augmentée par l'emploi d'un contour spécialement dessiné au bord avant de la face d'entrée du tournant. Un avantage supplémentaire de la vanne à tournant sphérique est son étanchéité à la fermeture qui la fait agir comme une vanne d'arrêt.

Les vannes à membrane sont employées pour les liquides et les gaz corrosifs et dangereux, ainsi que pour les produits de grande pureté dans l'industrie des aliments et des boissons. L'ouverture et la fermeture sont commandées par le déplacement du centre de la membrane qui s'éloigne ou s'approche du passage du fluide dans le corps de vanne. L'étanchéité à la fermeture est une caractéristique de cette vanne dont la simplicité de construction assure un entretien facile. Ses principales limitations sont une pression maximale de service relativement faible, soit de 1 000 kPa (eff.) et la difficulté de régler son débit au-delà d'une ouverture de plus de 50%.

Les vannes à manchon compressible sont des appareils simples et peu coûteux. Elles sont principalement employées pour régler le débit de matières abrasives comme les boues traitées dans l'industrie minière. Le corps et la garniture interne sont constitués par un manchon de caoutchouc renforcé, contenu à l'intérieur d'une gaine métallique moulée. Par l'introduction d'air comprimé dans l'espace entre le manchon et la gaine, le manchon est étranglé et réduit la section d'écoulement. Ces vannes sont des dispositifs d'application spéciale conçus pour éviter les problèmes de corrosion et d'érosion que présentent les boues et les fluides difficiles à manipuler.

Actionneurs de vannes de régulation

Les types d'actionneurs de vannes de régulation sont nombreux. Les exigences de service, telles que celles énumérées ci-après, dictent le choix de l'actionneur.

- Mode de commande disponible — pneumatique ou électrique
- Effort de poussée à fournir
- Longueur de la course
- Vitesse de la course
- Nature du corps de vanne
- Position requise en cas de panne d'alimentation en air comprimé ou en électricité.

Le vérin pneumatique à membrane rappelée par ressort est le type le plus employé sur les vannes de régulation. Les vérins sont généralement classés en deux types: à action directe (si la pression de commande croît, la course de la tige augmente) ou à action inverse (si la pression de commande croît, la course de la tige diminue). Le choix de l'action directe ou inverse dépend généralement des exigences de sécurité intrinsèque de la vanne qui repose sur l'action du ressort pour ramener le robinet en position sûre en cas de panne d'air comprimé.

Généralement, un vérin à piston est employé lorsque la vanne de régulation comporte de longues courses de manoeuvre ou subit des efforts intenses. Le piston peut être à commande hydraulique, pneumatique ou à gaz. Il existe des vérins à piston à simple effet et à double effet. Les vérins à piston peuvent facilement garantir la sécurité intrinsèque de la vanne de régulation, que ce soit pour la sécurité à la fermeture, la sécurité à l'ouverture ou à la sécurité à la dernière position. Une variante de ce type de vérin est l'actionneur électrohydraulique employant un moteur électrique en marche continuelle pour entraîner une pompe fournissant la pression hydraulique nécessaire à la commande du piston.

Les actionneurs à moteur électrique sont employés lorsqu'une alimentation d'air comprimé n'est pas disponible et que la vitesse de réponse n'est pas critique. Le moteur électrique est relié à l'arbre de la vanne par une boîte d'engrenages qui doit fournir les couples moteurs nécessaires. La durée de manoeuvre entre la position de fermeture totale et la position d'ouverture totale peut souvent atteindre 30 secondes. Par conséquent, l'usage de vannes de régulation à entraînement par moteur dans les systèmes de régulation automatique est peu répandu.

Positionneurs

Les vannes de régulation sont incapables, du fait de leurs caractéristiques de fonctionnement, d'être positionnées avec précision dans des conditions de service variables. En outre, des facteurs tels que la pression différentielle au siège du robinet, le serrage excessif du presse-étoupe et la manipulation de matières visqueuses ou encrassantes, peuvent même imposer des efforts supplémentaires qui empêchent la vanne de prendre la position demandée par le régulateur.

Le positionneur de vanne compare la position de la tige de la vanne à la commande du régulateur. Si la tige n'est pas dans la position voulue, le positionneur augmente ou diminue la pression d'air de commande agissant sur l'actionneur jusqu'à ce que la tige de la vanne soit dans la bonne position.

Certains positionneurs peuvent être commandés par un signal d'entrée pneumatique, et d'autres, par un signal électronique. Le positionneur électro-pneumatique reçoit son signal d'entrée d'un régulateur électronique et emploie de l'air comprimé comme force motrice pour positionner la vanne de régulation.

Accessoires de vanne de régulation

Un volant manuel peut être monté sur la plupart des vannes de régulation pour permettre à l'opérateur de prendre priorité sur le système de commande en manoeuvrant la vanne à la main. Plusieurs modèles de volants existent sur le marché. Certains permettent de manoeuvrer la vanne dans les deux sens sans que le ressort de vanne n'intervienne dans la course de retour, et d'autres comportent un embrayage qu'on doit dégager après avoir terminé les manoeuvres.

Des électrovannes sont généralement employées pour neutraliser le signal de commande automatique lorsqu'en cas de panne, la vanne de régulation doit passer en position de sécurité intrinsèque. Cette caractéristique est utile dans les opérations par lots, et elle est également employée dans les circuits d'enclenchement d'urgence pour que la désexcitation d'une électrovanne fasse passer la vanne de régulation en position de sécurité.

Les transducteurs électro-pneumatiques montés directement sur les vannes de régulation convertissent les signaux électroniques en signaux pneumatiques pour rendre les régulateurs électroniques compatibles avec des éléments de réglage final à commande pneumatique.

Les relais amplificateurs accèlèrent la vitesse de réponse de la vanne de régulation, ce qui est particulièrement utile lorsque la vanne est placée à plus de 50 mètres du régulateur pneumatique.

Servomoteurs

Les servomoteurs positionnent les dispositifs de réglage tels que registres, volets d'entrée de ventilateur, vannes commandées par levier comme les vannes papillon, régulateurs de vitesse, dispositifs d'entraînement à vitesse variable et vannes à combustible dans les petites chaudières. Il existe plusieurs types de servomoteurs quoiqu'ils ne présentent pas une aussi grande variété que les vannes de régulation.

Les servomoteurs peuvent être employés pour la régulation par tout ou rien ou pour la régulation proportionnelle. Les servomoteurs pneumatiques comportent des vérins à piston ou à membrane. Les combinaisons de signaux et d'alimentation énumérées ci-après donnent une idée de la variété disponible:

- Signal pneumatique et entraînement par air comprimé
- Signal électrique et entraînement par air comprimé
- Signal électrique et entraînement par moteur électrique
- Signal électrique ou pneumatique tout ou rien et entraînement par air comprimé
- Signal électrique tout ou rien (fermeture de contacts) et entraînement électrique.

Les combinaisons susmentionnées varient considérablement dans leurs exigences en couple moteur, mais celles-ci sont généralement satisfaites par une plage de couple nominal en service continu allant de 1 à 7 500 Nm. Les accessoires sont si diversifiés qu'ils peuvent répondre à une grande variété de besoins en contrôle et en régulation automatique.

Dispositifs d'entraînement à vitesse variable

De nombreux équipements emploient une certaine forme d'entraînement à vitesse variable pour modifier la vitesse de l'équipement entraîné. Les dispositifs d'entraînement à vitesse variable se subdivisent en trois grandes catégories:

- Les dispositifs d'entraînement électriques où varie la vitesse d'un moteur électrique à courant continu ou alternatif.
- Les dispositifs d'entraînement hydrauliques ou pneumatiques où le débit d'air fourni à un moteur de type à palettes fait varier la vitesse du moteur.
- Les dispositifs d'entraînement dans lesquels les joues d'une poulie à vitesse variable sont séparées ou accolées pour faire varier le diamètre de la poulie d'entraînement et ainsi la vitesse de la poulie asservie.
- Tous ces dispositifs d'entraînement peuvent être commandés par un signal automatique faisant varier la vitesse de l'équipement asservi.

Alimenteurs automatiques

Les processus de traitement par lots et en continu exigent différentes sortes de systèmes de régulation de l'alimentation des matières traitées. Certains alimenteurs automatiques peuvent convenir indifféremment à plusieurs types de processus, mais la nature des processus reste néanmoins un critère valable pour définir l'alimenteur.

Dans les processus de traitement par lots, on doit mesurer des poids ou des volumes de matière, le traitement ne commencant pas tant que tous les ingrédients ne sont pas réunis. On peut employer des mesures de poids gravimétriques pour peser une quantité déterminée ou un alimenteur volumétrique pour mesurer les unités de volume. Les quantités ou les volumes ainsi définis sont ensuite comptés jusqu'à ce qu'ils correspondent à un lot complet. Ainsi, ce type d'alimentation est essentiellement une opération de mesure associée à une méthode comptage.

Dans les processus de traitement en continu, la quantité de matière doit être définie selon un certain volume ou d'un certain poids par unité de temps. La mesure du volume ou du poids par unité de temps peut être appliquée dans une boucle de régulation dont le signal de sortie fait modifier le taux d'alimentation du produit. Il existe plusieurs dispositifs capables de répondre à un tel signal, dont la plupart font varier le taux d'alimentation en modifiant la vitesse d'une grandeur. Les dispositifs dont la vitesse peut être modifiée pour régler le taux d'alimentation comprennent tous les types de transporteurs, distributeurs vibrants, alimenteurs à tablier métallique, tables tournantes et distributeurs à tambour alvéolé.

Les pompes doseuses sont une forme d'alimenteur. Le dosage des produits chimiques ajoutés à l'eau d'alimentation d'une chaudière pour prévenir la corrosion en est un exemple. Chaque cycle ou chaque course de la pompe injecte un volume déterminé de liquide. On peut modifier le taux de dosage grâce à un dispositif d'entraînement à vitesse variable ou en faisant varier la longueur de la course.

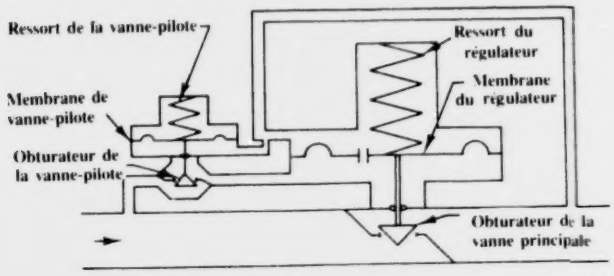
Régulateurs autonomes

Le régulateur de pression autonome fut mis au point à la fin du siècle dernier. Il consiste généralement en un obturateur, un siège, une tige, une membrane, un ressort et un corps (figure 10). La membrane est le «cerveau» du régulateur de pression puisqu'elle permet de comparer la pression de consigne, représentée par la force d'un ressort, avec la pression à régler. La différence de force positionne l'obturateur de la vanne pour qu'il modifie la pression du fluide jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli, autrement dit jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'écart entre la pression de consigne exercée par le ressort et la pression du fluide. Ainsi, la membrane est à la fois un appareil de régulation par rétroaction, un détecteur d'écart, et un actionneur.

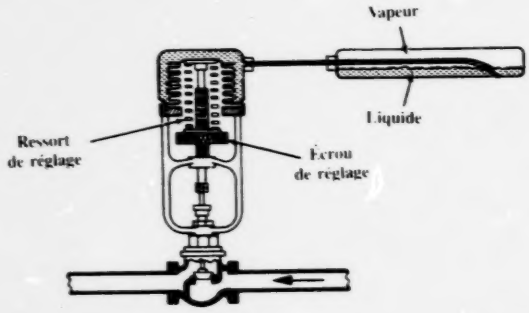
Le régulateur à vanne-pilote est une variante du régulateur à ressort; il s'agit d'un système à deux étages (figure 35). La vanne-pilote constituant le premier étage est elle-même une sorte de régulateur à ressort qui règle la pression exercée sur la membrane du régulateur principal. Ce type d'appareil présente deux avantages; en premier lieu, le fluide de commande agissant sur la vanne-pilote du premier étage est à la pression d'amont, ce qui fournit une plus grande force au mécanisme de manoeuvre; et en second lieu, la course de la tige de la vanne étant courte, elle réduit l'écart permanent (différence entre la pression désirée et la pression réelle). Ainsi, le régulateur à vanne-pilote assure la régulation précise d'une vaste gamme de pressions et de débits. La vanne-pilote (premier étage) peut être à l'intérieur ou à l'extérieur du régulateur principal.

Les régulateurs de température diffèrent physiquement des régulateurs de pression de plusieurs façons. L'actionneur du régulateur est souvent un mécanisme à soufflet relié par un tube capillaire à bulbe sensible. Le bulbe, le capillaire et le soufflet sont un ensemble scellé rempli d'un liquide, d'un gaz ou de vapeur. Les deux fluides de remplissage les plus couramment utilisés sont une vapeur et un liquide.

Le fonctionnement du régulateur de température à pression de vapeur est représenté dans la figure 36. L'actionneur est partiellement rempli d'un liquide volatil, chimiquement stable aux températures supérieures à la gamme de service du régulateur. L'ampoule sensible contient l'interface liquide-vapeur. Ainsi, la pression à l'intérieur du soufflet de l'actionneur devient la pression de vapeur du liquide de remplissage. Cette pression de vapeur, qui augmente lorsque la température monte, agit sur le soufflet en s'opposant à la résistance du ressort pour produire la force motrice nécessaire au déplacement de l'obturateur de la vanne de régulation.



Régulateur de pression à vanne-pilote
Figure 35



Régulateur de température
Figure 36

Systèmes

L'objectif de la présente section est de décrire en détail les systèmes de régulation de processus pour aider le lecteur à comprendre davantage ce qui précède. Les systèmes de régulation automatique sont parfois trop diversifiés et complexes à comprendre sans une certaine connaissance des appareils. Cependant, le présent module devrait provoquer les réactions suivantes:

- Éveiller l'intérêt envers les possibilités de la régulation automatique;
- Démontrer que la régulation automatique peut engendrer des économies;
- Donner la confiance nécessaire sur le sujet pour pouvoir consulter d'autres personnes et mieux évaluer les aspects techniques et économiques de l'application des systèmes automatiques dans une installation particulière.

Régulation d'un processus

Souvent, plusieurs solutions de régulation peuvent résoudre un problème de fonctionnement d'un processus. Une étude minutieuse du processus permet d'éliminer les solutions les moins appropriées. Les questions que le lecteur doit se poser sur le fonctionnement d'un processus varient selon la nature de celui-ci. La liste suivante donne les différents aspects qui doivent être pris en considération.

- Quels sont les objectifs du processus?
- Quelles est la principale pièce d'équipement du processus, et comment fonctionne-t-elle?
- Quel est le degré de prévisibilité des paramètres du processus?
- Quelles grandeurs doivent être maintenues et quelle est la variation maximale acceptable? Y a-t-il des avantages économiques à réduire les variations de la grandeur contrôlée (en d'autres termes, vaut-il la peine d'acheter un système de régulation plus coûteux pour obtenir une régulation plus rigoureuse)?
- Quelles sont les perturbations incontrôlées existantes et leur amplitude? Devrait-on les mesurer et les régler?
- Y a-t-il un délai important entre le moment où une perturbation se produit et le moment où elle se manifeste dans la grandeur contrôlée?
- De combien la grandeur contrôlée varie-t-elle lors d'une variation type du signal de perturbation d'entrée?
- Y a-t-il une deuxième ou une troisième grandeur de processus qui pourrait être employée dans le système de régulation pour aider à éliminer les problèmes liés aux temps de réponses du processus?
- Y a-t-il un problème quelconque de mesure?
- Quelle est la gamme de réglage théorique désirée de la grandeur asservie et de l'élément de réglage final?
- Quelles conditions du processus doivent être maintenues pour assurer la sécurité dans toutes les circonstances de démarrage, de fonctionnement et d'arrêt?

Solutions de régulation

Normalement, la régulation d'un processus peut être effectué de plus d'une manière. Lorsqu'on a pu répondre à toutes les questions susmentionnées, il devrait être plus facile de choisir la solution la plus logique et la plus rentable. L'exemple de régulation d'un échangeur de chaleur (figure 37) montre sept solutions différentes pour un même problème.

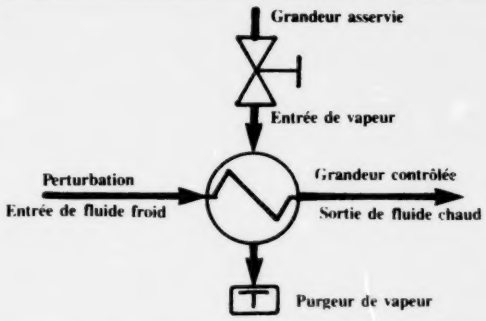
Le processus de base est représenté dans la figure 37-A. Un fluide est chauffé par la vapeur dans un échangeur. L'objectif est de maintenir une certaine température en faisant varier la quantité de vapeur dans l'échangeur de chaleur. La forme la plus simple de régulation est une vanne de vapeur à commande manuelle. Dans ce cas, l'opérateur remplit la fonction d'asservissement.

Pour une régulation automatique, la solution la moins coûteuse est un interrupteur de température par tout ou rien (figure 37-B) ou un régulateur de température autonome (figure 37-C). Dans la régulation par interrupteur de température (TS) tout ou rien, les contacts s'ouvrent ou se ferment lorsque la température devient respectivement supérieure ou inférieure à la température de consigne. Lorsque la température baisse au-dessous du point de consigne, le contact de l'interrupteur se ferme et l'électrovanne (S) est excitée: la vanne s'ouvre alors pour laisser entrer de la vapeur. Lorsque la température dépasse le point de consigne, le contact de l'interrupteur s'ouvre et l'électrovanne provoque la fermeture de la vanne.

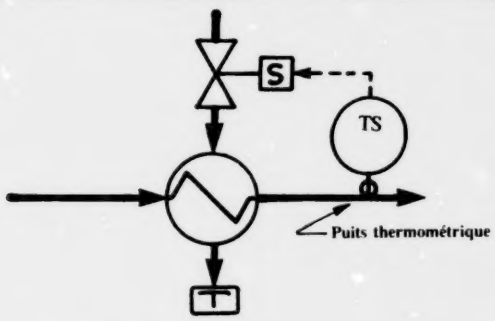
La figure 37-C montre le fonctionnement d'un régulateur de température autonome (TCV). La pression dans le système scellé augmente et diminue dans le même sens que la température du fluide mesuré. Ainsi, lorsque la température dépasse le point de consigne, l'augmentation de pression dans la partie supérieure du régulateur positionne l'obturateur interne pour réduire le débit de vapeur. Cette régulation est plus uniforme que celle par tout ou rien, mais les deux systèmes présentent un certain écart permanent entre la température réelle et la température de consigne.

La figure 37-D représente une boucle de régulation à asservissement pneumatique par rétroaction. La mise en service de ce système est plus facile que pour ceux des figures 37-B et 37-C. D'après les actions correctrices choisies, ce genre de régulation pourrait supprimer tout écart permanent. Il permet en outre une certaine souplesse dans le choix de l'emplacement du régulateur de température (TIC) et de la vanne de régulation (TV).

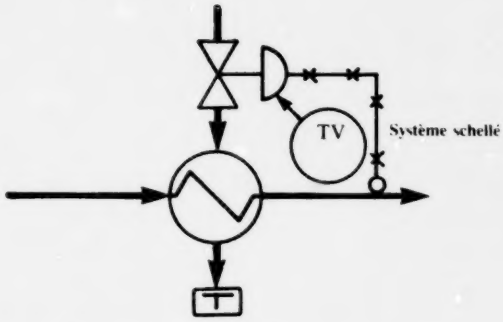
La régulation par anticipation désigne un système de régulation dans lequel l'action correctrice est déterminée d'après la mesure d'une perturbation du processus. Il est à noter que la figure 37-A comprend une action manuelle d'asservissement, alors que dans les figures 37-B, 37-C et 37-D l'asservissement s'obtient automatiquement. La figure 37-E représente un système dans lequel le débit du fluide de processus destiné à l'échangeur de chaleur est la grandeur selon laquelle est réglé le débit de vapeur. En théorie, cela signifie que la variation est détectée avant qu'elle n'influence la température du fluide de l'échangeur de chaleur, constituant une régulation de meilleure qualité. Cependant, sans asservissement, les conditions de service varieraient forcément avec le temps et la régulation de la température ne pourrait être satisfaisante.



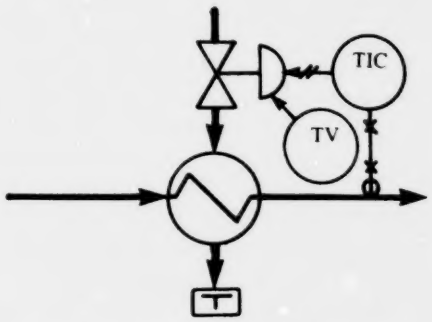
Processus de base — Régulation manuelle
(A)



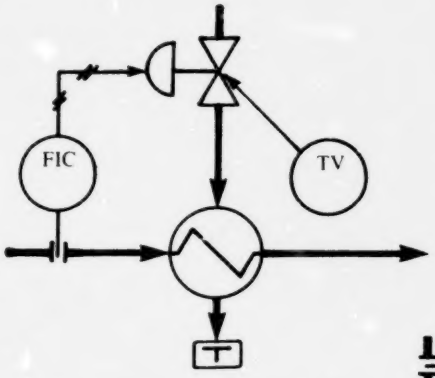
Régulation de température par tout ou rien
(B)



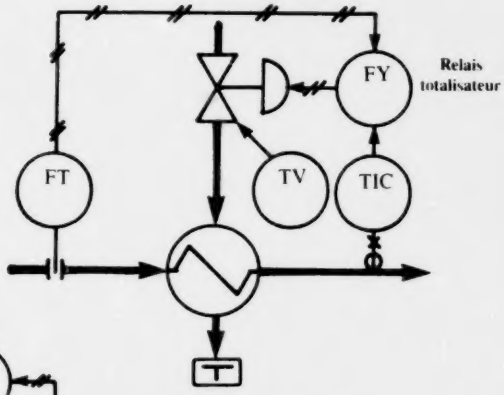
Régulateur de température autonome
(C)



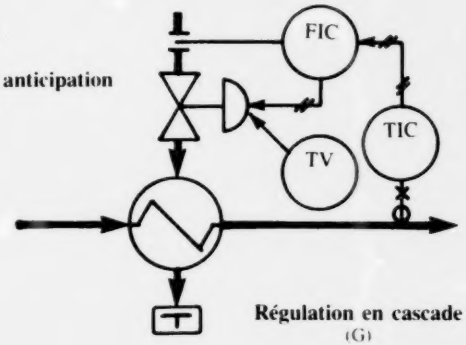
Régulation à asservissement pneumatique
(D)



Régulation par anticipation
(E)



Régulation à asservissement et par anticipation
(F)



Régulation en cascade
(G)

Plusieurs exemples de régulation
Figure 37

Les principes de la régulation à asservissement et par anticipation peuvent être combinés avantageusement (figure 37-F). Cette boucle de régulation combine les caractéristiques des boucles D et E. Ainsi, toute variation de débit du fluide du processus est immédiatement détectée par le transmetteur de débit (FT) qui transmet un signal par l'intermédiaire du relais totalisateur à la vanne de régulation (TV). Lorsque l'appareillage et la capacité de la vanne ont été bien choisis, la plupart des perturbations possibles du processus sont éliminées. Le régulateur de température (TIC) n'a alors qu'à détecter des variations mineures de température, ce qui démontre l'insuffisance de la régulation par anticipation. Le régulateur (TIC) élimine tout écart en modifiant le signal transmis à la vanne de régulation (TV).

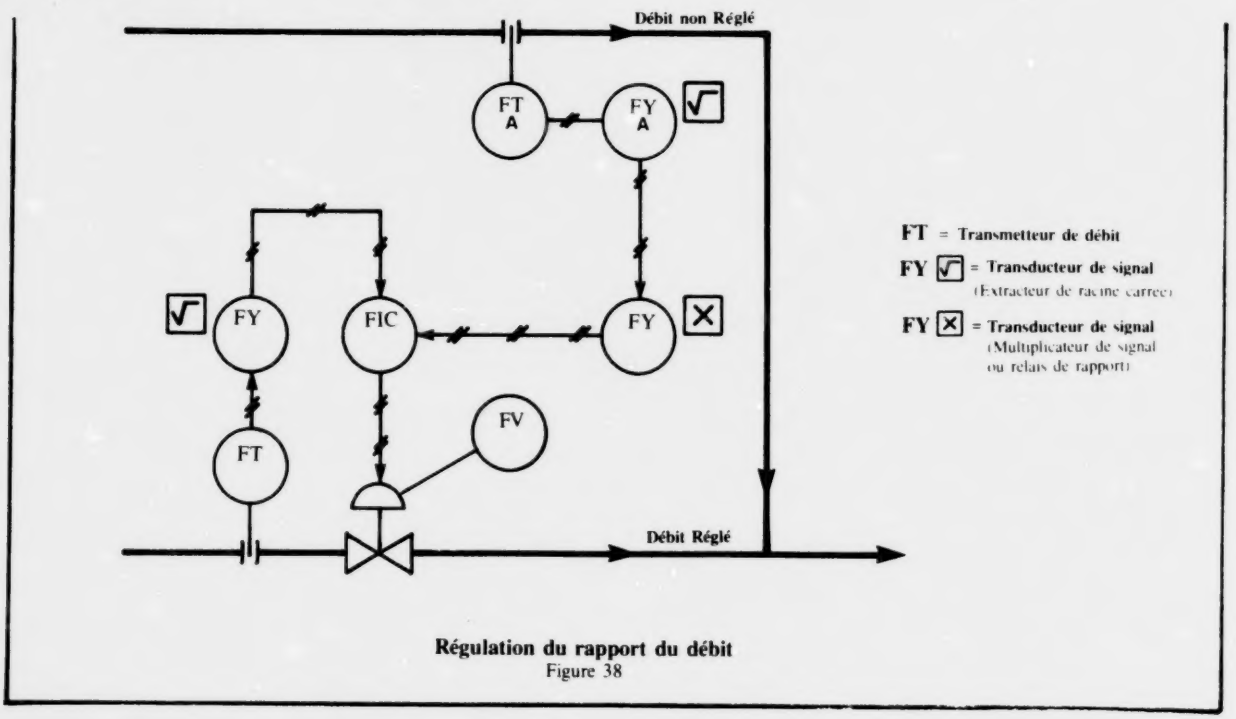
La régulation en cascade désigne un système dans lequel des régulateurs automatiques sont disposés en plusieurs étages successifs, la sortie d'un étage constituant l'entrée de l'étage suivant. Généralement, cette forme de régulation est limitée à deux étages, où la sortie du régulateur du premier étage devient l'entrée de consigne du régulateur du deuxième étage. Dans un système de régulation en cascade, le premier régulateur (couramment appelé régulateur primaire ou principal) est actionné par la grandeur de processus qui doit être maintenue à une valeur constante, et le régulateur secondaire est actionné par une grandeur capable de modifier la grandeur primaire. La sortie du régulateur primaire définit ainsi le point de consigne du régulateur secondaire qui commande un élément de réglage final.

Un système de régulation en cascade, s'il convient bien au processus et s'il est correctement installé, peut réduire l'effet des constantes de temps de la boucle et éliminer l'effet des perturbations captées dans la grandeur secondaire avant qu'elles pénètrent dans la boucle primaire. La figure 37-G applique ce principe au même échangeur de chaleur. La boucle de régulation de température (TIC) du fluide de processus définit le point de consigne imposé à la boucle de régulation du débit de vapeur (FIC). Cela aide à réduire les perturbations causées par le système d'alimentation en vapeur et procure une régulation à asservissement sur les autres sources de perturbation.

Régulation du rapport de débit

La régulation du rapport de débit consiste à régler un débit de processus pour maintenir un rapport déterminé avec un autre débit de processus (figure 38). Le point de consigne du débit réglé est généralement fixé par un dispositif qui multiplie la valeur mesurée du débit non réglé par le rapport désiré. Les signaux représentant les débits mesurés doivent avoir les mêmes caractéristiques, linéaires ou à racine carrée.

$$\text{Rapport de débit désiré} = \frac{\text{débit réglé}}{\text{débit non réglé}}$$



Régulation du rapport du débit
Figure 38

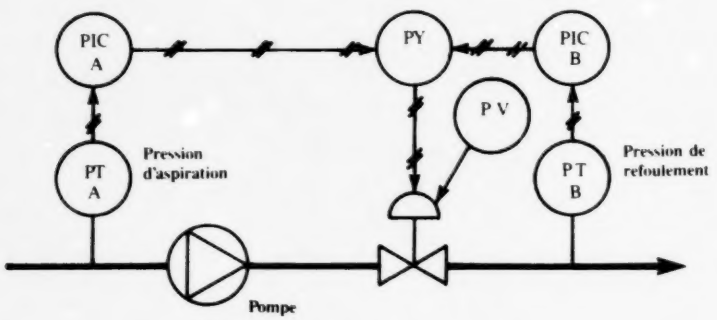
Toute une variété de systèmes de régulation du rapport de débit s'applique aux cas les plus divers, depuis le mélange de divers grades d'essence moteur jusqu'au dosage des agents chimiques dans les usines de traitement d'eau. Un débitmètre transmetteur est monté dans chaque courant mesuré (figure 38). Les deux signaux sont reçus par le système de régulation qui transmet un signal de sortie à une vanne montée sur la conduite «réglée». Cette vanne permet de régler l'écoulement d'après le rapport de débit désiré.

Régulation par priorité

La régulation par priorité est un système de régulation dans lequel deux grandeurs de processus sont mises en relation de façon que l'une ou l'autre puisse être règlée par la même grandeur asservie. Une des grandeurs réglables est maintenue à un point de consigne déterminé pourvu que la deuxième se trouve sur le côté «sûr» de son point de consigne. Si la deuxième grandeur vient à s'approcher de son point de consigne, l'action de régulation se reporte automatiquement sur elle pour l'empêcher de dépasser son point de consigne. La première variable s'éloigne alors de son point de consigne, mais toujours dans une direction sans risque.

Un système de régulation automatique des pressions d'aspiration et de refoulement d'une station de pompage de pipeline (figure 39) est un exemple type de ce mode de régulation.

La régulation doit maintenir la pression de refoulement à 700 kPa (eff.) tout en veillant à ce que la pression d'aspiration ne tombe pas au-dessous de 7 kPa (eff.). Si la pression d'aspiration baisse et s'approche de 7 kPa (eff.), la régulation est automatiquement transférée au régulateur de pression d'aspiration qui agit alors sur la même vanne de régulation. La pression de refoulement baisse quelque peu au-dessous de 700 kPa (eff.) pendant que la pression d'aspiration de la pompe est maintenue à 7 kPa (eff.). Le transfert se maintient jusqu'à ce que la pression de refoulement remonte à 700 kPa, auquel cas la régulation revient au régulateur de pression de refoulement. Par conséquent, le système de régulation par priorité empêche la pression d'aspiration de baisser au point où le phénomène de cavitation risquerait de se produire si la pression d'aspiration s'approchait de la pression de vapeur du fluide.



Régulation par priorité
Figure 39

Systèmes de régulation par lots

Les sytèmes de régulation par lots peuvent fonctionner sur une base d'évènements, de temps, de mesure, ou d'une combinaison des trois. De plus, les systèmes par lots peuvent être à mesures analogiques ou numériques et peuvent avoir des pauses délibérées pour permettre l'intervention d'un opérateur. La régulation par lots peut également faire intervenir des données analogiques ou numériques par l'emploi d'ordinateurs, de régulateurs programmables, de relais et de minuteries en conjonction avec la plupart des types d'appareils de mesure. Bref, les systèmes de régulation par lots sont aussi variés que les besoins. Il est rare que deux systèmes soient identiques.

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE

Les Possibilités de gestion de l'énergie identifient différentes façons d'utiliser rationnellement l'énergie pour réduire les coûts d'exploitation. Dans ce chapitre, plusieurs exemples de possibilités sont donnés sous les rubriques Possibilités de maintenance, Possibilités d'amélioration de coût modique et Possibilités de rénovation. Le présent chapitre n'énumère pas de façon exhaustive toutes les possibilités existantes. Il est toutefois destiné à stimuler la vigilance du personnel de gestion, d'exploitation et de maintenance dans la recherche de toutes les possibilités qu'offrent leurs installations.

On a déjà mentionné que les économies d'énergie ne découlent pas directement de l'emploi d'appareils de régulation automatique. C'est plutôt l'application d'appareils à d'autres équipements et systèmes qui permet de réaliser des économies. Cela signifie que l'étude des autres modules doit se faire en gardant bien à l'esprit, lors de la sélection des équipements, l'optimisation des processus et de l'exploitation. Les autres modules de la présente série contiennent des feuilles de travail permettant de faire les calculs détaillés indispensables à l'étude des possibilités de gestion d'énergie.

Le présent chapitre a pour objet de montrer par des exemples concrets comment les appareils de régulation automatique peuvent réaliser des économies d'énergie et réduire les coûts d'exploitation. Nous avons omis les calculs détaillés qui exigent la compréhension du fonctionnement d'équipements et de systèmes spécialisés (par exemple, systèmes de conditionnement d'air, chaudières, échangeurs de chaleur et compresseurs d'air). Puisque l'emploi judicieux des appareils de régulation automatique peut procurer toutes sortes d'économies, chaque installation doit être évaluée en fonction des avantages à retirer d'un tel appareillage.

Possibilités de maintenance

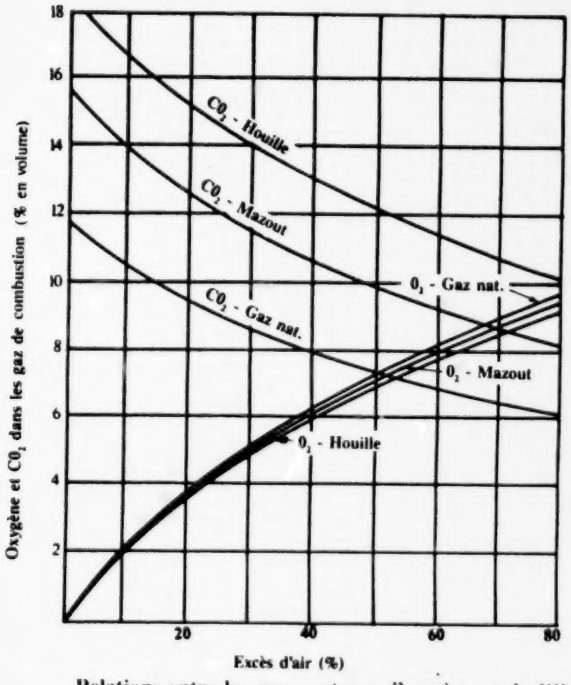
Les possibilités de maintenance sont des initiatives de gestion de l'énergie exécutées de façon périodique, au moins une fois par année. En ce qui concerne l'appareillage de régulation automatique, la maintenance comprend des activités telles que le réglage périodique des appareils et la réparation des défectuosités des systèmes.

Inspection et étalonnage périodiques de l'appareillage de régulation

Les défaillances graves des appareils de mesure et de régulation peuvent être constatées par le personnel d'exploitation. Cependant, les défaillances se manifestent le plus souvent par une détérioration progressive du rendement, décelable seulement par des indices non évidents. Par conséquent, il est important de reconnaître les premiers signes d'un rendement hors norme et d'implanter un programme d'étalonnage qui élimine les dérivés des appareils avant qu'elle nuise sérieusement à l'exploitation des processus. Les exemples qui suivent montrent comment une telle vigilance peut être exercée.

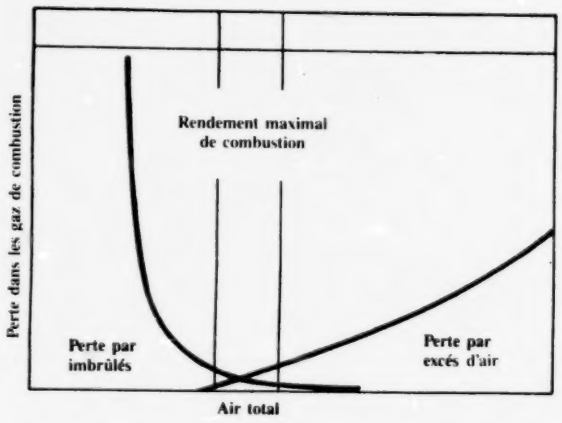
1. Les facteurs susceptibles d'affecter la précision de mesure doivent être surveillés avec attention à cause des conséquences qu'ils peuvent avoir sur l'action des systèmes de régulation. Par exemple, une pression de gaz naturel inférieure à la pression nominale provoque une indication de débit supérieure à sa valeur réelle. Se reporter à ce sujet au Module 15 — Mesures et contrôles.
2. La dérive d'un régulateur chargé de maintenir le rapport désiré entre le débit de combustible et le débit d'air alimentant une chaudière peut entraîner un excès d'air ou la présence d'imbrûlés causé par l'insuffisance d'air. Dans les deux cas, on peut constater cette perte en observant l'enregistreur d'oxygène et d'imbrûlés ou en vérifiant manuellement la composition des gaz de cheminée à l'aide d'un analyseur Orsat.
3. Une autre vérification rentable est l'étalonnage des dispositifs de régulation de pression dans un système de conditionnement d'air à deux conduits pour que soit maintenue dans les deux conduits une pression statique minimale. Se reporter au Module 10 — Le conditionnement d'air, qui contient d'autres exemples à ce sujet.
4. Les boucles entières de régulation doivent subir des vérifications périodiques portant sur l'étalonnage des appareils de mesure et des points de consigne, le fonctionnement des éléments de réglage final et le rendement global de chaque boucle. Le fonctionnement des boucles peut comporter une combinaison d'échelons séquentiels et d'actions proportionnelles.

5. On doit vérifier périodiquement les registres, y compris leur tringlerie de commande, pour s'assurer qu'ils fonctionnent sans heurt et que leur fermeture soit étanche.
6. Dans le cas des appareils de régulation à commande pneumatique, le système d'alimentation en air comprimé doit faire l'objet d'une surveillance régulière. On doit entre autre, éliminer les fuites d'air, purger les accumulations de liquide dans les purgeurs et vérifier l'état des éléments filtrants. Se reporter à ce sujet au Module 12 — Systèmes de distribution d'eau et d'air comprimé.
7. Il peut arriver qu'une boucle de régulation dont les composants sont bien étalonnés et bien mis au point ne fonctionne pas de façon satisfaisante à cause de la confusion ou de la négligence de l'opérateur. En vérifiant périodiquement le fonctionnement de l'appareillage et en conversant avec le personnel d'exploitation, on peut découvrir des cas nécessitant une surveillance accrue.



Relations entre les pourcentages d'oxygène et de CO_2 et l'excès d'air

Figure 40



Zone de rendement de combustion maximal

Figure 41

Optimisation des systèmes de régulation

Les activités de maintenance discutées précédemment peuvent assurer que les boucles de régulation présentent un rendement conforme aux normes de l'installation. Cependant, ces normes peuvent avoir été définies dans une période où l'on insistait moins qu'aujourd'hui sur la nécessité d'économiser de l'énergie et de réduire les coûts d'exploitation. Une possibilité d'économie peut être engendrée par la création d'une activité distincte pour l'optimisation des systèmes de régulation, qui se concentrera sur le rendement des boucles. Quelques exemples sont donnés ci-après pour stimuler la réflexion sur les possibilités pouvant exister dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel.

1. Inspecter les thermostats et les relocaliser s'ils se trouvent sur des murs extérieurs ou dans des courants d'air.
2. En régime de chauffage, baisser le point de consigne des thermostats car chaque degré d'abaissement de la température représente une économie d'environ 2,5% de la consommation d'énergie de chauffage.
3. Dans les périodes de non-occupation, baisser le point de consigne des thermostats.
4. En régime de climatisation, monter le point de consigne des thermostats.
5. Régler les systèmes de conditionnement d'air à zones multiples de façon à réduire les températures de gaine chaude et à augmenter les températures de gaine froide en tenant compte des charges thermiques des zones critiques. Il faut noter que bien que cette initiative réduira la consommation d'énergie, elle réduira également les capacités de chauffage et de climatisation du système.
6. Régler et équilibrer les systèmes de commande du chauffage et de la climatisation pour minimiser les surintensités de chauffage et de climatisation qui résultent d'un mauvais zonage, d'une mauvaise distribution et d'un mauvais fonctionnement du système de régulation.

7. Une chaudière est un processus relativement complexe constituant un bon exemple puisqu'il se retrouve dans de nombreuses installations. La figure 40 montre que, dans un processus de combustion, la quantité idéale d'air à combiner avec le combustible est limitée à une plage étroite, appelée «zone de rendement de combustion maximale». Une surabondance d'air de combustion augmente sans nécessité les pertes par excès d'air dans les gaz de cheminée, alors qu'une insuffisance d'air augmente les pertes par imbrûlés en plus de créer un risque d'explosion. Le rapport combustible-air représente la quantité totale d'air à introduire, et le pourcentage d'air en excès (figure 41). À cause du conservatisme des personnes responsables de l'exploitation des chaudières et du personnel chargé de l'appareillage de régulation, il est courant d'avoir un excès d'air trop élevé. Les dépenses en réglages plus sûrs et plus efficaces entraînent des économies de combustible qui peuvent être considérables. L'importance de ces économies dépend de la température des gaz de cheminée, mais généralement une réduction de 1% d'oxygène entraîne une réduction de 5% de l'excès d'air et des économies de combustible de l'ordre de trois quart de 1%. Se reporter au Module 5 — La combustion, pour plus de détails à ce sujet.
8. Régler les dispositifs de commande de façon à empêcher le fonctionnement simultané du système de chauffage et du système de climatisation pour maintenir la température désirée.

Possibilités d'amélioration de coût modique

Les possibilités d'amélioration de coût modique sont des initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois et dont le coût n'est pas élevé. Elles se distinguent donc des travaux de maintenance qui sont périodiques. La troisième et dernière catégorie traite des *possibilités de rénovation* c'est-à-dire celles comportant des modifications trop coûteuses pour faire partie de la catégorie des améliorations de coût modique. La distinction entre ces deux types de possibilités dépend de la taille et de la nature de l'installation en cause, et cette distinction doit être définie par l'administration responsable.

Régulation par tout ou rien

Dans le chapitre sur les notions de base, on a mentionné que la régulation par tout ou rien était très répandue en raison de son coût relativement modique. Il existe une grande variété de régulateurs par tout ou rien; les possibilités décrites ci-après montrent comment l'utilisation de ces régulateurs permet d'économiser de l'énergie et réduire les coûts d'exploitation.

1. Installer des thermostats pour asservir tous les équipements de chauffage.
2. Installer des régulateurs à recul nocturne pour programmer le chauffage et la climatisation de chaque zone du système en fonction des horaires d'occupation. Il faut pour cela déterminer le moment opportun pour élever la température afin d'assurer le confort des occupants à leur arrivé au travail.
3. Installer des couvercles de plastique verrouillables sur les thermostats pour empêcher les occupants de modifier les réglages.
4. Installer des cellules photo-électriques pour commander l'éclairage extérieur ou périmétrique.
5. Installer un commutateur-sectionneur d'éclairage fonctionnant à basse tension pour permettre d'éteindre l'éclairage à la fin des périodes d'occupation à partir d'un ou de plusieurs postes de commande. Des minuteries sept jours peuvent également être employées pour commander automatiquement la marche des systèmes d'éclairage.
6. Les appareils d'éclairage d'une zone restent souvent allumés après que le personnel l'ait quitté. Dans le cas d'une zone de réception de camions, on peut poser un capteur actionné par la sortie des véhicules. Une minuterie reliée au capteur laisse s'écouler un certain délai et provoque l'extinction de la plupart des appareils d'éclairage de la zone.
7. Installer des dispositifs de fermeture automatique de portes aux points d'accès du personnel et des véhicules lorsque ces portes communiquent avec l'extérieur.
8. Installer un dispositif d'interdiction d'ouverture sur les volets d'admission d'air extérieur pour qu'ils restent fermés pendant les périodes de reprise du chauffage ou de la climatisation du bâtiment.
9. Installer des minuteries automatiques pour abaisser le point de consigne des températures la nuit et les fins de semaine dans toutes les zones à faible fréquence d'occupation.
10. Dans certains cas, l'installation d'un mode de régulation très simple et peu coûteux peut entraîner des économies considérables. Par exemple, une petite boulangerie exploitait une ligne de cuisson continue. Le produit était emballé directement du transporteur de déchargement du four. Tout article manqué par l'emballeur s'en allait aux rebuts. Les rebuts après cuisson dépassaient 20% de la production. Un interrupteur à cellule photo-électrique fut posé en aval de l'emballeur pour capter la présence d'un article sur le transporteur. Ainsi, chaque fois qu'un article dépassait l'emballeur, le transporteur s'arrêtait automatiquement pour qu'il soit récupéré. Cela réduisit les rebuts après cuisson à moins de 5% de la production.

11. Un système de régulation a toujours besoin d'un système de mesure, mais il arrive aussi qu'un système de mesure ait besoin d'un système de régulation lorsque ses exigences de précision et de marge de réglage théorique sont très rigoureuses. Lorsque la mesure des débits de vapeur est utilisée pour fins de facturation, la précision est importante pour les débits faibles autant qu'élevés. Lorsque les variations prévues dans le débit de vapeur dépassent la marge de réglage théorique des débitmètres de vapeur, il faut employer un débitmètre à gamme basse en parallèle avec un autre à gamme haute. Un circuit automatique de commutation sélectionne le débitmètre approprié en fonction du débit, et c'est la sortie de ce débitmètre qui fournit alors les débits à facturer.

Régulation proportionnelle

La régulation proportionnelle est normalement plus complexe que la régulation par tout ou rien mais sa complexité varie considérablement, puisqu'elle peut être assurée par de simples régulateurs autonomes ou par d'imposants systèmes de commande centralisée. Cet appareillage si diversifié peut, en outre, être appliqué à toutes sortes d'opérations dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel. Cela signifie que les possibilités d'applications indiquées ci-après ne montrent qu'une infime partie de la vaste gamme de possibilités réelles.

1. Installer des régulateurs de débit et de température de l'eau dans les salles de douche.
2. Dans un processus de fabrication, une quantité incontrôlée d'eau était employée au lavage des pièces, qu'on laissait s'égoutter à l'égout. Un régulateur autonome de débit à point de consigne réglable fut installé pour déterminer et maintenir le débit minimal admissible.
3. Lorsqu'il s'agit d'applications telles que des systèmes de chauffage au mazout lourd, convertir le système par tout ou rien en un système asservi à un régulateur autonome. Cette modification doit être justifiée, certes, mais les raisons en sa faveur pourraient inclure l'élimination des variations inacceptables de température ou l'uniformisation de la demande de vapeur.
4. Convertir un processus de traitement par lots en un traitement en continu peut présenter plusieurs avantages, notamment un fonctionnement plus uniforme du processus, un meilleur rendement en présence d'une même capacité de production, et la récupération de la chaleur entre les diverses étapes du processus.
5. Améliorer les dispositifs de régulation des systèmes de conditionnement d'air pour empêcher qu'un fonctionnement simultané du chauffage et de la climatisation soit nécessaire pour produire les conditions de température désirées.
6. Dans les systèmes de conditionnnement d'air, remplacer les appareils de traitement d'air, les régistres et les appareils de commande qui ne fonctionnent pas de façon satisfaisante.
7. Ajouter les appareils et les dispositifs de régulation nécessaires pour convertir un système de conditionnement d'air à débit constant en un système à débit variable.
8. Dans un système de conditionnement d'air à zones multiples, installer des vannes de régulation automatique pour régler les températures des gaines d'air chaud et des gaines d'air froid en fonction de la demande. Lorsque ce genre de système est correctement installé, et que tous les registres des gaines d'air chaud et d'air froid sont partiellement fermés, la régulation devrait progressivement abaisser la température des gaines chaudes et augmenter celle des gaines froides jusqu'à ce qu'un ou plusieurs registres de zone soient complètement ouverts.
9. Convertir les systèmes de conditionnement d'air à un seul conduit en un système à débit variable, en ajoutant des boîtes régulatrices de débit à chaque branchement. Le débit des ventilateurs doit être réglé en fonction de la demande.
10. Prévoir un dispositif de régulation de débit au ventilateur et réduire sa capacité, de préférence en diminuant la vitesse, lorsque les débits des gaines chaudes et des gaines froides peuvent être réduits tout en continuant de répondre aux demandes de pointe. Le fait de réduire les pertes et les gains de chaleur permet de réduire la quantité d'air manipulé.
11. Transformer les systèmes de conditionnement d'air à deux conduits en systèmes à débit variable lorsque l'étude énergétique le recommande et que les économies d'énergie éventuelles en assurent la rentabilité. On effectue cette transformation en ajoutant des boîtes régulatrices de débit et des régulateurs de ventilateurs.
12. Installer des registres d'entrée d'air à commande automatique à l'entrée des ventilateurs, ou des dispositifs d'entraînement à vitesse variable pour réduire les débits d'air en période de faible demande.
13. Dans les bureaux, doter les climatiseurs d'un cycle économiseur et/ou d'un dispositif de régulation par enthalpie. Cela réduit au minimum la consommation d'énergie de refroidissement en n'utilisant que les quantités appropriées d'air neuf et d'air repris pour permettre un «refroidissement gratuit» par l'air neuf lorsque possible.

14. Les installations grandes consommatrices d'électricité payent l'électricité d'après une tarification tenant compte à la fois de la consommation et de la demande de pointe. Les coûts liés à la demande ne correspondent à aucun avantage énergétique pour l'installation, et on doit chercher à les éviter. Etudier la possibilité d'installer un régulateur de demande de pointe pour réduire celle-ci et les coûts qui sont associés. Se reporter au Module 3 — L'Électricité, pour plus de détails.
15. Le rapport entre l'excès d'air des chaudières et les économies de combustible fut discuté dans les exemples de maintenance, dans la section traitant de l'appareillage de régulation. Un système de régulation existant peut être si rudimentaire qu'un système supérieur se justifierait facilement par les seules économies de combustible. Ainsi, on pourrait réaliser des économies en transformant un système de positionnement simple en un système de régulation du rapport des débits air/combustible. Si un tel système existe déjà, une autre amélioration pourrait se faire par l'ajout d'un système automatique de correction de la teneur en oxygène. Dans ces deux exemples, l'objectif est de maintenir les conditions optimales de marche présentées dans la figure 40.
16. La purge continue des chaudières réduit la quantité des solides dissouts et en suspension dans le circuit d'alimentation d'eau. Comme le débit de purge peut représenter 8% de la production de la chaudière, le rejet global en volume et en contenu énergétique peut représenter des pertes thermiques considérables. D'un autre côté, l'état de l'eau de purge pourrait être continuellement mesuré pour que le taux de purge soit réglé à la valeur la plus faible possible tout en maintenant les conditions d'eau à des limites acceptables. Ce genre de boucle de régulation peut réduire de 50% les pertes initiales par la purge. Se reporter au Module 6 — Appareillage de chaufferie, pour plus de détails.

Régulation séquentielle

La régulation séquentielle fait intervenir des détecteurs tels que des interrupteurs de température, de pression, de niveau et à cellule photo-électrique qui sont associés à des relais, des minuteries et autres interrupteurs pour constituer un système logique pas à pas. Ces systèmes peuvent enclencher des actions consécutives de façon que la deuxième étape ne puisse pas s'amorcer tant que la première n'est pas terminée. Ce mode de régulation peut être employé pour accélérer un processus, réduire le personnel et assurer le maintien des conditions de sécurité essentielles. Les exemples suivants montrent comment on peut en retirer des économies réelles.

1. La marche normale des appareils d'éclairage extérieur commandés par cellule photo-électrique peut être combinée avec une minuterie sept jours empêchant l'allumage la fin de semaine.
2. Pour l'éclairage intérieur, un commutateur-sectionneur commandé par une minuterie sept jours peut éteindre tous les appareils d'éclairage à la fin des périodes d'occupation.
3. Installer des minuteries sept jours qui agissent en priorité sur les réglages normaux du chauffage et de la climatisation pendant les fins de semaine.
4. Ajouter un contrôleur de stage aux éléments dans les systèmes de chauffage électrique. On obtient une régulation plus efficace de la chaleur et un meilleur contrôle de la demande en électricité.
5. Une usine de traitement de produits alimentaires stérilisait les bocaux dans des cuves d'eau chaude chauffées à la vapeur. À un certain point du cycle, l'eau chaude était évacuée progressivement à l'égout et remplacée par de l'eau froide. La perte d'eau chaude à l'égout était importante. Un système de régulation séquentiel fut installé pour emmagasiner temporairement l'eau chaude entre les cuvées. Le système séquentiel comprenait un détecteur de température qui amorçait le cycle de refroidissement, des minuteries qui surveillaient les durées de séjour nécessaires pour certaines conditions, et des vannes d'arrêt commandées par relais qui dirigeaient l'eau chaude à l'entrée et à la sortie du réservoir de stockage.
6. Des commandes thermostatiques à deux consignes assurent une baisse automatique de la température des locaux la nuit et les fins de semaine. Celles-ci peuvent être intégrées à un dispositif simple pour permettre au personnel de conciergerie de court-circuiter les réglages de nuit.
7. Certains secteurs de l'industrie alimentaire emploient d'importants volumes d'eau pour laver les zones de traitement, souvent après chaque quart de travail. Lorsqu'on emploie régulièrement de l'eau chaude à cette fin, il y a plusieurs moyens de conserver l'énergie thermique. On peut, par exemple, recueillir l'eau chaude ayant servi au lavage final pour la réemployer comme eau de lavage initial, la fois suivante. Cela veut dire que l'eau est toujours employée deux fois avant d'être évacuée à l'égout, mais le lavage final est toujours fait avec de l'eau chaude propre. Un système automatique de régulation séquentielle commande le fonctionnement d'une pompe d'assèchement, des vannes et d'un réservoir de stockage selon l'avancement du cycle de lavage.

8. Les cas sont nombreux où un produit est chauffé et refroidi par la suite. En installant un système de régulation séquentielle, il est possible de faire passer le fluide froid dans un échangeur de chaleur pour qu'il soit réchauffé par le fluide chaud qui doit être refroidi. Ainsi, le produit dirigé vers le cycle de chauffage est réchauffé d'avance et le produit dirigé vers le cycle de refroidissesment perd déjà une partie de sa chaleur.

Possibilités de rénovation

Les *possibilités de rénovation sont des initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois et dont le coût est important*. Un appareillage de régulation automatique peut être appliqué à la plupart des types d'équipements et de processus, de sorte qu'il est possible de présenter de façon systématique les diverses possibilités de rénovation. La présente section montre par quelques exemples comment un appareillage de régulation automatique peut faire économiser de l'énergie et réduire les coûts d'exploitation.

Régulation analogique

La cogénération d'énergie désigne le processus selon lequel on produit de la vapeur surchauffée à haute pression qui entraîne une turbine à vapeur, laquelle entraîne à son tour une génératrice électrique. La vapeur à basse pression prélevée à l'échappement de la turbine est utilisée dans les processus ou les systèmes de chauffage de l'installation. Ce double emploi de la vapeur compose l'avantage économique d'une telle formule. Par contre, le bon contrôle de son rendement peut exiger un système de régulation analogique assez imposant. Ce système doit comprendre toutes les boucles de régulation normalement associées à une chaudière, en plus des dispositifs supplémentaires servant à la régulation de température de la vapeur, à la régulation de vitesse de la turbine, et à la surveillance du fonctionnement du collecteur de vapeur d'échappement qui desservent les installations consommatrices.

Régulateur programmable

Il est impossible de décrire toutes les applications typiques d'un régulateur programmable. Des exemples tirés de différents secteurs d'activités sont énoncés ci-après pour montrer combien le domaine d'emploi de ce mode de régulation est vaste.

1. Les machines à papier fins doivent avoir une certaine souplesse d'adaptation pour que leurs conditions de marche puissent être modifiées en fonction des différentes qualités de papier dictées par la clientèle. Vu qu'il y a une recette différente pour chaque grade de papier, les recettes sont mémorisées dans le régulateur programmable. Ainsi, les différents mélanges de pâtes, de produits chimiques et de colorants sont commandés automatiquement d'après la sélection faite par l'opérateur dépendant du grade de papier et de la quantité à fabriquer. La régulation séquentielle du transfert du mélange vers la machine à papier est aussi commandée par le régulateur. Des rapports de gestion sur l'emploi des matières premières et les quantités finales de production peuvent être imprimés automatiquement par le système.
2. Les régulateurs programmables conviennent bien à la régulation des mélangeurs de caoutchouc (mélangeurs Banbury) utilisés dans les industries du caoutchouc et des plastiques. Le régulateur règle avec précision les appareils de pesage qui mesurent les ingrédients à incorporer, tels que noir de carbone, huiles, cires, inhibiteurs d'oxydation et pigments, en plus de régler les temps d'addition des ingrédients, les cycles de mélange, les pressions de triturage et les séquences de vidange par lots. D'une part, le régulateur assure ainsi l'uniformité des additions d'ingrédients, ce qui améliore la qualité du produit et augmente le rendement des machines, et d'autre part, il peut produire après chaque quart de travail des rapports indiquant les quantités d'ingrédients entrées dans la fabrication.
3. Dans l'industrie textile, la mesure par lots des colorants liquides est une fonction importante. La souplesse d'exploitation et la précision de mesure sont indispensables lorsqu'il s'agit de changer de recette de colorant. Plusieurs opérations se combinent pour constituer le bon mélange: la détermination des quantités, le pesage, la manoeuvre des vannes, la durée de mélange, la sélection des réservoirs, le fonctionemment des mélangeurs, le positionnement précis des trémies mobiles, l'affichage de l'état des lots et la production de rapports sur les lots fabriqués. Si un tel processus n'était pas automatique, les calculs prendraient beaucoup de temps et risqueraient de comporter plusieurs erreurs.
4. Des systèmes de gestion énergétique de l'ensemble d'une installation peuvent être basés sur des régulateurs programmables qui surveillent, par exemple, les températures intérieure et extérieure, le fonctionnement des équipements des appareils de chauffage et de climatisation. Un régulateur programmable pourrait commander des appareils de commande de chauffage et de climatisation individuels ou groupés, les dispositifs d'admission d'air de ventilation, les appareils d'éclairage et d'autres appareils consommateurs d'énergie d'après les horaires de fonctionnement des installations. La consommation et la demande de pointe d'électricité pourraient aussi être surveillées aux postes de transformation, pour qu'une alarme soit déclenchée lorsque la valeur de pointe est sur le point d'être atteinte.

5. L'assemblage d'automobiles comporte plusieurs opérations séquentielles qui doivent être soigneusement interconnectées. Pendant nombre d'années, cette interconnexion a été réalisée par des relais, des minuteries, des boutons-poussoirs et voyants encombrants et qui exigeaient des câblages individuels qu'il fallait souvent refaire totalement pour les modèles de l'année suivante. Un régulateur programmable est asservi à des détecteurs comme des interrupteurs photo-électriques, mais il peut facilement être jumelé à des composants logiques et être adapté aux améliorations du processus.
6. Les régulateurs programmables ont trouvé des applications dans une foule de processus courants. Dans un lave-auto, par exemple, le système peut accepter une instruction spéciale de cirage, reconnaître la voiture et actionner le matériel d'application de la cire, les jets d'eau et le matériel de polissage. Le dispositif de repérage précis de la voiture tient compte de sa longueur par rapport à l'équipement, ce qui réduit le coût des opérations. Le débit des voitures traitées peut également être modifié. Le régulateur programmable peut facilement subir des modifications pour améliorer progressivement le fonctionnement du lave-auto.
7. Les équipements de manutention sont un autre bon exemple d'application d'un régulateur programmable. Il peut permettre la combinaison de plusieurs transporteurs, la régulation des charges minimale et maximale transportées, la sélection d'itinéraires multiples, le chargement et le déchargement du produit, l'affichage de l'opération et une certaine capacité d'intervention par l'opérateur.

Ordinateur

Un ordinateur pourrait assurer la régulation de tous les processus décrits dans le présent module ainsi qu'une foule d'autres applications plus vastes et plus complexes. Sa justification économique est un calcul complexe qui met en rapport l'importance des dépenses initiales et des coûts annuels ainsi que les avantages annuels à retirer. Ces avantages peuvent inclure la qualité, la quantité, le rendement, la sécurité, la souplesse d'adaptation et la fiabilité, ainsi que l'obtention de rapports de gestion plus complet. Ce type d'étude doit être fait par une personne ou une équipe compétente. Voici quelques exemples d'application d'un ordinateur.

1. Le chapitre sur l'appareillage a décrit les ensembles à base de microprocesseur couramment utilisés pour assurer automatiquement la régulation d'une chaufferie complète. Ces ensembles peuvent exécuter de nombreuses opérations, notamment la régulation de la combustion et de l'alimentation en eau, la régulation séquentielle des systèmes de marche des brûleurs, les calculs de rendement, la détermination des charges optimales de chaudières, et la production de rapports. Ces ensembles sont employés dans les chaufferies de beaucoup d'installations industrielles, bâtiments commerciaux et immeubles de caractère public, étant justifiés par les économies de combustible qu'ils procurent.
2. Les systèmes de pesage commandés par ordinateur sont couramment employés dans les postes routiers d'inspection des camions. L'ordinateur accepte l'information provenant de systèmes de pesage dynamique et statique, et il adresse des instructions au chauffeur sur un panneau électronique de messages (pendant que le camion est encore en mouvement). Les données d'identification du camion sont entrées manuellement par l'opérateur pour être ensuite automatiquement combinées avec l'information de pesage sur un rapport imprimé indiquant aussi la date et l'heure.
3. Une entreprise décida de construire une vaste usine fabriquant un substitut pour le sucre. Le marché était très concurrentiel, ce qui donnait une grande importance au rendement. Le processus, quelque peut complexe, était encore en mutation à cause de certaines innovations technologiques. Un système d'ordinateur à double sécurité fut choisi pour assurer la régulation de toutes les boucles de traitement, pour contrôler et donner automatiquement l'alarme en cas de conditions hors normes, et pour fournir des rapports d'exploitation et de gestion.
4. Dans une usine de produits chimiques, on construisit une station d'épuration de traitement des rejets pour traiter un volume d'effluents de 24 000 m^3 par jour avant de les évacuer dans une rivière. Le processus faisait intervenir une nouvelle technologie et on savait qu'une certaine mise au point originale serait nécessaire avant que la station d'épuration puisse être mise en service. Dans le processus, certaines grandeurs contrôlées subissaient plusieurs interactions perturbatrices. On prit la décision d'employer un petit système d'ordinateur pour effectuer la régulation numérique (DDC) des grandeurs contrôlées, ce qui permettrait aux grandeurs en interaction d'être intégrées aux boucles de régulation. Après la mise en service et une période de rodage, il fut possible de rectifier certaines stratégies de régulation en modifiant les instructions programmées. L'ordinateur pouvait également fournir des rapports d'exploitation et de gestion.

5. Une importante installation de traitement du courrier en vrac devait traiter 2 000 tonnes de sacs de courrier et de colis individuels par jour (jusqu'à 500 000 articles par jour). En un seul jour, le courrier devait être reçu, stocké, trié vers des centaines de destinations, regroupé par destinations, stocké de nouveau et ensuite livré par camions à mesure qu'ils arrivaient. Un vaste système d'ordinateur à double sécurité (soit un ordinateur soutenu par un autre ordinateur actif) fut sélectionné pour la régulation séquentielle variable des 1 200 transporteurs servant au triage. La salle de commande comptait plusieurs imprimantes qui produisaient les rapports périodiques de fonctionnement normale et les rapports d'alarme. Le panneau de commande et le pupitre de l'opérateur intégraient des dispositifs qui communiquaient avec l'ordinateur et plusieurs écrans de télévision en circuit fermé. Cet aménagement permettait à l'opérateur du poste central de savoir comment le fonctionemment de toute l'installation se déroulait.
6. La régulation de la demande de pointe d'électricité peut être effectuée automatiquement par des ordinateurs chargés de redistribuer la charge pendant les périodes de pointe. À cette fin, il faut analyser le fonctionnement complète de l'installation pour identifier les principaux consommateurs d'électricité et définir les conditions qui permettraient de réduire ou d'interrompre la consommation de certains d'entre eux pendant les pointes les plus fortes. Un ordinateur peut facilement calculer les diverses combinaisons d'interruptions possibles et les façons d'optimiser le fonctionnement de l'ensemble des installations. L'ordinateur commanderait alors les équipements d'après le programme établi.
7. Les compagnies d'électricité et les compagnies de transport électrifié surveillent leurs réseaux de distribution électrique à l'aide de systèmes de surveillance d'exploitation et d'acquisition des données (SCADA). Ces systèmes sont commandés par ordinateur, et ils peuvent être programmés pour commuter les charges d'une source d'alimentation sur une autre lorsque des problèmes d'exploitation surviennent.

ANNEXES

A Glossaire
B Conversions courantes
C Liste de contrôle

Glossaire

Le Module 15 — *Mesures et contrôles* et le Module 16 — *La régulation automatique* étant étroitement liés, ils doivent être utilisés ensemble pour l'étude des possibilités de la gestion de l'énergie. Le présent glossaire s'applique à ces deux modules.

Action de régulation — Mode de régulation désignant la manière dont la grandeur d'entrée affecte la grandeur de sortie.

Action dérivée — Action du régulateur caractérisée par le fait que la grandeur de sortie est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart de réglage. L'action dérivée sert à éliminer les problèmes liés aux temps de réponse de l'organe de mesure.

Action intégrale — Action du régulateur caractérisée par le fait que la grandeur de sortie varie avec une vitesse proportionnelle à l'écart. L'action intégrale sert à éliminer les écarts entre le point de consigne et la grandeur mesurée.

Action proportionnelle — Action du régulateur caractérisée par le fait que la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la variation de la grandeur contrôlée.

Action proportionnelle et dérivée (P.D.) — Action du régulateur caractérisée par le fait que la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la combinaison linéaire de la variation de la grandeur contrôlée et de la vitesse de variation de l'écart de réglage.

Action proportionnelle et intégrale (P.I.) — Action du régulateur caractérisée par le fait que la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la combinaison linéaire de la variation de la grandeur contrôlée et de la vitesse proportionnelle à l'écart.

Action proportionnelle, intégrale et dérivée (P.I.D.) — Action du régulateur caractérisée par le fait que la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la combinaison linéaire de la variation de la grandeur contrôlée, de la vitesse proportionnelle à l'écart, et de la vitesse de variation de l'écart de réglage.

Alarme — Signal sonore ou visuel révélant l'existence d'une condition anormale.

Analyse au passage — Inspection visuelle d'une installation pour étudier la consommation de l'énergie.

Analyse des gaz de cheminée — Mesure des composants des produits de combustion, habituellement exprimée par le pourcentage en volume d'oxygène (O_2), de monoxyde de carbone (CO) ou de gaz carbonique (CO_2).

Analyse de diagnostic — Analyse d'une possibilité d'économie d'énergie pouvant comporter l'évaluation du fonctionnement du processus, le calcul des économies possibles et l'évaluation des frais d'immobilisation et des coûts d'exploitation afin de calculer la rentabilité de l'investissement.

Appareil de mesure — Appareil qui évalue la grandeur d'une quantité ou d'un état.

Appareil enregistreur — Appareil qui enregistre les diverses grandeurs de la grandeur mesurée.

Appareil indicateur — Appareil qui indique la valeur actuelle de la grandeur mesurée.

Appareillage — Ensemble des appareils et instruments assurant la mesure et le contrôle direct du processus.

Autorégulation — Propriété d'un processus ou d'une machine d'atteindre un régime stable après une perturbation, sans l'intervention d'un régulateur.

Avertisseur — Dispositif destiné à donner des signaux sonores et/ou visuels pour informer le personnel d'exploitation de l'existence d'une condition anormale.

Bande proportionnelle — Variation nécessaire de la grandeur à régler pour que le régulateur effectue toute sa course. Inverse du gain proportionnel.

Boucle fermée (boucle à asservissement) — Parcours d'un signal incluant une chaîne d'action, une chaîne de réaction et un point de sommation, le tout formant un circuit fermé.

Collecteur de données — Appareil électronique d'enregistrement des données qui assure le stockage et le traitement des données.

Commutateur automatique-manuel — Dispositif permettant à l'opérateur de choisir un signal d'entrée automatique ou manuel pour un élément de réglage final. Le signal automatique est généralement un signal de sortie de régulateur, alors qu'un signal manuel est un signal de sortie d'un appareil fonctionnant à la main.

Comptabilisation de l'énergie — Activité consistant à recueillir avec précision toute l'information se rapportant à la production et à la consommation de l'énergie, et à en faire l'analyse aux fins d'établissement de rapports et de contrôle.

Conditions de service — Conditions de marche auxquelles un dispositif est assujetti (excluant la grandeur qu'il mesure).

Consommation d'air — Taux maximal d'air consommé par un dispositif à l'intérieur de sa gamme de service en présence des signaux reçus en régime établi.

Contrôle — Observation de l'état d'un processus ou d'une installation à l'aide d'appareillage dit de contrôle. Dans le présent module, le contrôle englobe également l'analyse des données recueillies par l'appareillage de contrôle.

Course de l'indicateur — Longueur de l'échelle graduée d'un indicateur.

Débitmètre — Dispositif qui mesure le débit ou la quantité d'un fluide circulant dans un conduit ouvert ou fermé.

Dérive — Variation indésirable progressive de la grandeur de sortie.

Écart permanent — Différence entre le point de consigne et la grandeur contrôlée en régime établi.

Écran cathodique — Appareil de visualisation qui permet un dialogue interactif entre l'opérateur et l'ordinateur ou le collecteur de données.

Élément de réglage final — Élément de la chaîne de régulation qui agit directement sur la grandeur asservie.

Élément primaire — Élément chargé de convertir la grandeur mesurée en une autre grandeur, utilisable par le transmetteur.

Élément sensible — Élément qui réagit directement à la grandeur mesurée.

Énergie — Grandeur caractérisant l'aptitude d'un système physique à fournir un travail. L'énergie existe sous différentes formes transformables: énergie thermique (chaleur), mécanique (travail), électrique et chimique. L'énergie est mesurée en kilowattheures (kWh) ou en mégajoules (MJ).

Énergie gaspillée — Énergie dissipée sans avoir été pleinement utilisée.

Étalon — Unité de mesure normalisée qui permet de comparer les grandeurs de façon précise.

Étalonner — Régler un appareil de mesure pour que ses indications de sortie correspondent à la série déterminée de valeurs de la grandeur à mesurer.

Fiabilité — Aptitude d'un appareil à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné.

Gamme de mesure — Zone définie par les valeurs limites des portées minimale et maximale.

Grandeur asservie — Grandeur sur laquelle agit le régulateur pour maintenir la grandeur contrôlée à la valeur prescrite.

Grandeur contrôlée — Dans une boucle de régulation, grandeur physique qui doit être maintenue à la valeur désirée.

Grandeur mesurée — Grandeur, propriété ou état mesuré.

Intervalle de mesure — Différence algébrique entre les portées minimale et maximale.

Limites de fonctionnement — Ensemble des conditions de service auxquelles un dispositif peut être assujetti sans que ses caractéristiques de fonctionnement soient affectées de façon permanente.

Linéarité — Le degré de rapprochement d'une course à une ligne droite.

Mesure d'un processus — Acquisition des données permettant de connaître la grandeur des quantités intervenant dans un processus.

Micro-ordinateur — Ordinateur à circuit ou composant unique qui comprend un microprocesseur comme unité centrale de traitement, une mémoire et des circuits d'entrée/sortie intégrés.

Microprocesseur — Circuit ou dispositif microélectrique qui assure les fonctions de traitement des données d'un ordinateur.

Mise au point — Réglage des régulateurs et observation de la réaction du processus en vue d'obtenir un fonctionnement qui réagit de façon acceptable aux perturbations du processus.

Ordinateur — Appareil électronique qui reçoit des entrées, en effectue le traitement et produit des sorties. Il comprend une unité centrale de traitement, une mémoire et des circuits d'entrée/sortie.

Période d'échantillonnage — Intervalle de temps entre les observations effectuées par un système à échantillonnage périodique.

Perturbation — Modification intervenant dans un processus ayant pour effet d'éloigner la grandeur contrôlée de son point de consigne.

Plage d'insensibilité — Différence de deux valeurs limites d'une grandeur d'entrée entre lesquelles une variation de celle-ci ne provoque pas une variation significative de la grandeur de sortie.

Point de consigne — Variable d'entrée qui règle la valeur prescrite de la grandeur contrôlée.

Portée maximale — Valeur maximale de la grandeur d'un instrument de mesure.

Portée minimale — Valeur minimale de la grandeur d'un instrument de mesure.

Possibilités d'amélioration de coût modique — Initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois, et dont le coût n'est pas élevé.

Possibilités de maintenance — Initiatives de gestion de l'énergie exécutées de façon périodique, une fois par année.

Possibilités de rénovation — Initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois, et dont le coût est important.

Poste de contrôle central — Bloc d'appareils ou groupement de blocs d'appareil qui assure les fonctions de mesure, de régulation et/ou de surveillance d'un processus.

Pouvoir calorifique — Énergie totale contenue dans un combustible, exprimée en mégajoules (MJ).

Précision de mesure — Différence entre la valeur affichée et la valeur mesurée.

Précision nominale — Pour un instrument de mesure, valeur qui définit l'erreur maximale qu'un mesurage peut présenter dans les conditions d'emploi déterminées. La précision nominale tient compte des effets combinés des erreurs de conformité, d'hystérésis, de plage d'insensibilité et de répétabilité. La précision est exprimée d'après la grandeur mesurée, soit en pourcentage de la gamme de mesure, en pourcentage de la portée maximale ou en pourcentage de la valeur indiquée.

Pression absolue — Toute pression dont la base de mesure est le vide absolu, exprimée en kPa (abs.).

Pression de rupture — Pression à laquelle un dispositif éclate (déterminée par un essai).

Pression de service — Pression à laquelle un dispositif est soumis dans des conditions normales de fonctionnement.

Pression différentielle — Différence de pression entre deux points.

Pression dynamique — Pression mesurée dans le sens du débit moins la pression statique.

Pression effective — Toute pression dont la base de mesure est la pression atmosphérique, exprimée en kPa (eff.). À noter que kPa (eff.) + pression atmosphérique = kPa (abs).

Pression maximale de service — Pression totale maximale admissible à tout moment dans un dispositif en marche à une température prescrite.

Pression statique — Pression exercée dans toutes les directions par un fluide au repos. Lorsqu'il s'agit d'un fluide en mouvement, la pression statique est mesurée dans un sens perpendiculaire au débit.

Processus — Transformation physique ou chimique de la matière ou conversion de l'énergie.

Régime établi — État dans lequel une grandeur mesurée ou un instrument ne change pas avec le temps.

Réglage de la gamme de mesure — Dispositif intégré dans un instrument permettant de modifier la forme de la courbe d'entrée-sortie.

Réglage du zéro — Fonction d'un instrument qui assure le déplacement parallèle de la courbe d'entrée-sortie.

Régulateur — Appareil qui contrôle les variations de la grandeur contrôlé.

Régulateur à action inverse — Régulateur caractérisé par le fait que la diminution de la grandeur du signal de sortie est proportionnelle à l'augmentation de la grandeur d'entrée (grandeur mesurée).

Régulateur à action directe — Régulateur caractérisé par le fait que l'augmentation de la grandeur du signal de sortie est proportionnelle à celle de la grandeur d'entrée (grandeur mesurée).

Régulateur autonome — Régulateur qui tire directement du système asservi l'énergie servant au fonctionnement de l'élément de réglage final.

Régulateur programmable — Dispositif électronique qui assure la régulation selon un logiciel en mémoire et la réaction des dispositifs d'entrée et de sortie.

Régulateur programmé — Régulateur qui maintient ou modifie automatiquement le point de consigne selon un programme de marche prédéterminé.

Régulation à asservissement — Mode de régulation qui compare la grandeur mesurée au point de consigne et qui émet un signal d'erreur pour réduire l'écart entre les deux valeurs.

Régulation à éléments multiples — Mode de régulation qui agit sur plus d'une grandeur de processus pour maintenir la grandeur contrôlée.

Régulation automatique — Tout mode de régulation ne nécessitant pas d'intervention humaine.

Régulation de processus — Régulation ou traitement des grandeurs en vue d'obtenir efficacement un produit d'une qualité définie.

Régulation de surveillance — Mode de régulation selon laquelle les boucles de régulation fonctionnent indépendamment selon des actions correctives intermittentes.

Régulation en cascade — Mode de régulation selon laquelle la grandeur de sortie d'un régulateur devient le point de consigne d'un autre régulateur.

Régulation numérique — Mode de régulation assuré par un calculateur numérique qui envoie le signal directement à l'élément de réglage final.

Régulation optimale — Mode de régulation qui recherche et maintient automatiquement la valeur la plus avantageuse d'une grandeur prescrite, plutôt que de la maintenir à une valeur fixe.

Régulation par anticipation — Mode de régulation selon laquelle les données relatives à une ou plusieurs conditions susceptibles de perturber la grandeur contrôlée sont converties, en dehors de toute boucle à asservissement, en une mesure corrective minimisant l'écart de cette grandeur.

Régulation par tout ou rien — Mode de régulation selon laquelle la grandeur de sortie du régulateur demeure à une valeur maximale ou minimale jusqu'à ce que la grandeur contrôlée franchisse un seuil déterminé. Le régulateur inverse alors son signal de sortie.

Régulation proportionnelle — Tout mode de régulation selon lequel les grandeurs asservies peuvent être réglées à n'importe quelle position à l'intérieur de la gamme de régulation pour maintenir la grandeur contrôlée au point de consigne.

Rendement énergétique — Mesure de l'efficacité de l'emploi de l'énergie exprimée en quantité d'énergie par unité de production.

Répétabilité — Étroitesse de l'accord entre les résultats de mesure successifs de la grandeur de sortie pour la même valeur de la grandeur d'entrée, dans les mêmes conditions de service, par le même observateur.

Réponse dynamique — Comportement de la grandeur de sortie relativement à la grandeur d'entrée par rapport au temps.

Sécurité intrinsèque — Un appareil ou un réseau dit «à sécurité intrinsèque» ne peut, en aucune condition (normale ou anormale), libérer suffisamment d'énergie électrique ou thermique pour provoquer l'allumage d'une atmosphère dangereuse.

Signal analogique — Signal représentant une grandeur qui peut être observée et représentée de façon continue.

Signal d'erreur — Signal indiquant l'écart entre le point de consigne et la grandeur contrôlée.

Signal de sortie — Signal produit par un dispositif.

Signal numérique — Représentation de l'information par un ensemble de valeurs discrètes conformément à une convention. Ces valeurs sont représentées par des nombres.

Température ambiante — Température relevée au voisinage d'un dispositif.

Temps mort — Intervalle de temps compris entre l'instant où l'on provoque une variation d'une grandeur d'entrée et l'instant où débute la variation corrélative de la grandeur de sortie.

Transducteur — Organe qui reçoit une information sous la forme d'une grandeur physique et la transforme en une grandeur physique de même nature ou de nature différente.

Transmetteur — Transducteur qui, grâce à un élément sensible, réagit à une grandeur mesurée et la transforme en un signal de transmission normalisé qui n'est fonction que de la grandeur mesurée.

Valeur idéale — Valeur exacte d'une grandeur mesurée par rapport à un étalon de mesure.

Valeur prescrite — Valeur désirée d'une grandeur.

Vanne de commande — Élément de réglage final qui module l'écoulement du fluide qui le traverse selon la commande d'un régulateur.

CONVERSIONS COURANTES

1 baril (35 gal imp.) (42 gal U.S.)	= 159,1 litres
1 gallon (imp.)	= 1,20094 gallon (U.S.)
1 cheval vapeur (chaudière)	= 9809,6 watts
1 cheval vapeur	= 2545 Btu/heure
1 cheval vapeur	= 0,746 kilowatts
1 joule	= 1 N-m
Kelvin	= (°C + 273,15)
1 kilowatt-heure	= 3600 kilojoules
1 Newton	= 1 Kg-m/s^2
1 thermie	= 10^5 Btu
1 tonne (réfrigérant)	= 12002,84 Btu/heure
1 tonne (réfrigérant)	= 3516,8 watts
1 watt	= 1 joule/seconde
degré Rankine	= (°F + 459,67)

Cubes

1 v^3 = 27 pi^3

1 pi^3 = 1728 po^3

1 cm^3 = 1000 mm^3

1 m^3 = 10^6 cm^3

1 m^3 = 1000 L

Carrés

1 v^2 = 9 pi^2

1 pi^2 = 144 po^2

1 cm^2 = 100 mm^2

1 m^2 = 10000 cm^2

PRÉFIXES SI

Préfixe	Symbole	Valeur numérique	Exposant
téra	T	1 000 000 000 000	10^{12}
giga	G	1 000 000 000	10^9
méga	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
hecto	h	100	10^2
déca	da	10	10^1
déci	d	0,1	10^{-1}
centi	c	0,01	10^{-2}
milli	m	0,001	10^{-3}
micro	u	0,000 001	10^{-6}
nano	n	0,000 000 001	10^{-9}
pico	p	0,000 000 000 001	10^{-12}

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS MÉTRIQUES EN UNITÉS IMPÉRIALES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/centimètre carré	A/cm^2	ampère/pouce carré	A/po^2	6,452
degré Celsius	°C	degré Fahrenheit	°F	(°C × 9/5) + 32
centimètre	cm	pouce	po	0,3937
centimètre cube	cm^3	pouce cube	po^3	0,06102
mètre cube	m^3	pied cube	pi^3	35,314
gramme	g	once	oz	0,03527
gramme	g	livre	lb	0,0022
gramme/litre	g/L	livre/pied cube	lb/pi^3	0,06243
joule	J	Btu	Btu	$9,480 \times 10^{-4}$
joule	J	pied-livre	pi-lb	0,7376
joule	J	cheval vapeur-heure	cv-h	$3,73 \times 10^{-7}$
joule/mètre, (Newton)	J/m, N	livre	lb	0,2248
kilogramme	kg	livre	lb	2,205
kilogramme	kg	tonne (longue)	tonne	$9,842 \times 10^{-4}$
kilogramme	kg	tonne (courte)	tn	$1,102 \times 10^{-3}$
kilomètre	km	mille	mille	0,6214
kilopascal	kPa	atmosphère	atm	$9,87 \times 10^{-3}$
kilopascal	kPa	pouce de mercure (32°F)	po de Hg	0,2953
kilopascal	kPa	pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	4,0147
kilopascal	kPa	livre/pouce carré	lb/po^2	0,1450
kilowatt	kW	pied-livre/seconde	pi-lb/s	737,6
kilowatt	kW	cheval vapeur	cv	1,341
kilowatt-heure	kWh	Btu	Btu	3413
litre	L	pied cube	pi^3	0,03531
litre	L	gallon (imp.)	gal (imp.)	0,21998
litre	L	gallon (U.S.)	gal (U.S.)	0,2642
litre/seconde	L/s	pied cube/minute	pi^3/min	2,1186
lumen/mètre carré	lm/m^2	lumen par pied carré	lm/pi^2	0,09290
lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	pied bougie	pi-b	0,09290
mètre	m	pied	pi	3,281
mètre	m	verge	yd	1,09361
partie par million	ppm	grain/gallon (imp.)	gr/gal (imp.)	0,07
partie par million	ppm	grain/gallon (U.S.)	gr/gal (U.S.)	0,05842
perméance (métrique)	PERM	perméance (imp.)	perm	0,01748
centimètre carré	cm^2	pouce carré	po^2	0,1550
mètre carré	m^2	pied carré	pi^2	10,764
mètre carré	m^2	verge carré	v^2	1,196
tonne (métrique)	t	livre	lb	2204,6
watt	W	Btu/heure	Btu/h	3,413
watt	W	lumen	lm	668,45

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/po^2	A/po^2	ampère/cm^2	A/cm^2	0,1550
atmosphère	atm	kilopascal	kPa	101,325
British Thermal Unit	Btu	joule	J	1054,8
Btu	Btu	kilogramme-mètre	kg-m	107,56
Btu	Btu	kilowatt-heure	kWh	$2,928 \times 10^{-4}$
Btu/heure	Btu/h	watt	W	0,2931
calorie, gramme	cal ou	g-cal joule	J	4,186
chaîne	chaîne	mètre	m	20,11684
pied cube	pi^3	mètre cube	m^3	0,02832
pied cube	pi^3	litre	L	28,32
pied cube/minute	pi^3/m	litre/seconde	L/s	0,47195
cycle/seconde	c/s	Hertz	Hz	1,00
degré Fahrenheit	°F	degré Celsius	°C	(°F−32)/1,8
pied	pi	mètre	m	0,3048
pied bougie	pi-b	lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	10,764
pied lambert	pi-L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,42626
pied-livre	pi-lb	joule	J	1,356
pied-livre	pi-lb	kilogramme-mètre	kg-m	0,1383
pied livre/seconde	pi-lb/s	kilowatt	kW	$1,356 \times 10^{-3}$
gallon (imp.)	gal (imp.)	litre	L	4,546
gallon (U.S.)	gal (U.S.)	litre	L	3,785
grain/gallon (imp.)	gr/gal(imp.)	partie par million	ppm	14,286
grain/gallon (U.S.)	gr/gal(U.S.)	partie par million	ppm	17,118
cheval vapeur	cv	watt	W	745,7
cheval vapeur-heure	cv-h	joule	J	$2,684 \times 10^6$
pouce	po	centimètre	cm	2,540
pouce de mercure (32°F)	po de Hg	kilopascal	kPa	3,386
pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	kilopascal	kPa	0,2491

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES (CONT.)

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
lambert	L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,183
lumen/pied carré	lm/pi^2	lumen/mètre carré	lm/m^2	10,76
lumen	lm	watt	W	0,001496
mille	mille	kilomètre	km	1,6093
once	oz	gramme	g	28,35
perm (0°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5,721 \times 10^{-11}$
perm (23°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5,745 \times 10^{-11}$
perm-pouce (0°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1,4532 \times 10^{-12}$
perm-pouce (23°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1,4593 \times 10^{-12}$
chopine (imp.)	chopine	litre	L	0,56826
livre	lb	gramme	g	453,5924
livre	lb	joule/mètre (Newton)	J/m N	4,448
livre	lb	kilogramme	kg	0,4536
livre	lb	tonne (métrique)	t	$4,536 \times 10^{-4}$
livre/pied cube	lb/pi^3	gramme/litre	g/L	16,02
livre/pouce carré	lb/po^2	kilopascal	kPa	6,89476
pinte	pinte	litre	L	1,1365
slug	slug	kilogramme	kg	14,5939
pied carré	pi^2	mètre carré	m^2	0,09290
pouce carré	po^2	centimètre carré	cm^2	6,452
verge carré	v^2	mètre carré	m^2	0,83613
tonne (longue)	ton	kilogramme	kg	1016
tonne (courte)	tn	kilogramme	kg	907,185
verge	v	mètre	m	0,9144

* "L" tel qu'utilisé dans l'éclairement

Les valeurs typiques qui suivent peuvent servir de facteurs de conversion quand les données réelles manquent. Les équivalents en MJ et en BTU correspondent à la chaleur de combustion. Les chiffres applicables aux hydrocarbures correspondent à la valeur calorifique la plus élevée (poids humide). Certains produits sont de toute évidence des matières premières, mais ont été inclus au tableau pour le rendre plus complet et pour servir de référence. Les facteurs de conversion pour le charbon sont approximatifs puisque la valeur calorifique de ce produit varie selon la mine d'où il a été extrait.

TYPE D'ÉNERGIE	MÉTRIQUE	IMPÉRIAL
CHARBON		
— métallurgique	29 000 mégajoules/tonne	25,0 × 10^6 BTU/tonne
— anthracite	30 000 mégajoules/tonne	25,8 × 10^6 BTU/tonne
— bitumineux	32 100 mégajoules/tonne	27,6 × 10^6 BTU/tonne
— sous-bitumineux	22 100 mégajoules/tonne	19,0 × 10^6 BTU/tonne
— lignite	16 700 mégajoules/tonne	14,4 × 10^6 BTU/tonne
COKE		
— métallurgique	30 200 mégajoules/tonne	26,0 × 10^6 BTU/tonne
— pétrolier		
— brut	23 300 mégajoules/tonne	20,0 × 10^6 BTU/tonne
— calciné	32 600 mégajoules/tonne	28,0 × 10^6 BTU/tonne
POIX	37 200 mégajoules/tonne	32,0 × 10^6 BTU/tonne
PÉTROLE BRUT	38,5 mégajoules/litre	5,8 × 10^6 BTU/baril
MAZOUT N° 2	38,68 mégajoules/litre	5,88 × 10^6 BTU/baril 0,168 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 4	40,1 mégajoules/litre	6,04 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 6 (MAZOUT LOURD C)		
— 2,5 % soufre	42,3 mégajoules/litre	6,38 × 10^6 BTU/baril 0,182 × 10^6 BTU/GI
— 1,0 % soufre	40,5 mégajoules/litre	6,11 × 10^6 BTU/baril 0,174 × 10^6 BTU/GI
— 0,5 % soufre	40,2 mégajoules/litre	6,05 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
KÉROSÈNE	37,68 mégajoules/litre	0,167 × 10^6 BTU/GI
DIESEL	38,68 mégajoules/litre	0,172 × 10^6 BTU/GI
GAZOLINE	36,2 mégajoules/litre	0,156 × 10^6 BTU/GI
GAZ NATUREL	37,2 mégajoules/m^3	1,00 × 10^6 BTU/M pi^3
PROPANE	50,3 mégajoules/kg 26,6 mégajoules/litre	0,02165 × 10^6 BTU/lb 0,1145 × 10^6 BTU/GI
ÉLECTRICITÉ	3,6 mégajoules/kWh	0,003413 × 10^6 BTU/kWh

Guide de l'utilisateur pour la liste de contrôle 16-1 sur la régulation automatique

Comme son nom l'indique, il s'agit d'une liste de contrôle et non d'une feuille de travail pour calculer les économies d'énergie. Cette liste a été dressée pour que l'étude de premier niveau soit effectuée de façon méthodique. On peut modifier cette liste et l'adapter à des besoins précis: les points suivants ne représentent que des points de repère. La numéroration correspond aux numéros figurant sur la liste de contrôle.

1. Les rubriques *Rendement du processus*, Sécurité et Consommation énergétique constituent logiquement les premiers points de vérification puisqu'ils permettent d'identifier les boucles de régulation nécessitant le plus d'amélioration. Pour évaluer le rendement du processus, il faut évidemment savoir si le processus fonctionne bien et ne cause pas de problèmes au personnel d'exploitation, mais la question fondamentale concerne l'*efficacité* de l'exploitation.
2. La *Sécurité* doit toujours être un critère primordial. Le système de régulation automatique peut, simultanément, satisfaire aux exigences *des codes gouvernementaux, de sécurité du personnel et de sécurité du produit*.
3. La rubrique *Consommation énergétique* sert à déterminer les meilleures possibilités d'économie d'énergie. Au début, on peut évaluer la consommation énergétique globalement et apporter des précisions ultérieurement, s'il y a lieu.
4. La *Capacité du processus* peut être déterminée par la productivité normale et la productivité maximale. Ce point de vérification peut entraîner l'étude des raisons relatives à la non atteinte d'une productivité maximale. Ces données peuvent également être utilisées pour établir le coût par unité de production comme base pour la définition d'objectifs de rendement.
5. La rubrique *Etat/durée de vie du processus* peut déterminer s'il vaut la peine d'améliorer le processus à l'aide d'un système de régulation automatique.
6. La *Qualité du processus* peut justifier l'ajout d'un système de régulation automatique même s'il ne réduit pas les coûts d'exploitation. En l'absence d'un certain degré de qualité, un produit peut ne jamais être commercialisable ou un système de conditionnement d'air peut créer des conditions d'ambiance inacceptables pour le personnel.
7. Le *Nombre de perturbations* qui survient dans un processus est un point essentiel à connaître pour bien comprendre le fonctionnement du processus.
8. L'*Élimination des perturbations* peut être la façon la plus efficace d'améliorer le fonctionnement du processus. Un fonctionnement inacceptable peut provenir d'une seule perturbation nuisible. Son influence sur le processus pourrait être réduite par différentes stratégies, notamment la correction automatique du facteur provoquant cette perturbation. Par le fait même, la perturbation se trouve éliminée.
9. Si l'organisation du processus est illogique, il ne faut pas supposer qu'aucune modification ne peut y être apportée. Les *Modifications du processus* peuvent être avantageuses même sans régulation automatique ou l'ajout d'un tel système de régulation peut leur permettre d'atteindre leur plein rendement.
10. L'évaluation du potentiel d'amélioration des systèmes de régulation doit commencer par l'étude des *Boucles de régulation existantes*.
11. Le *Suivi de l'appareillage* vise à attirer l'attention sur la possibilité de mieux utiliser l'appareillage des boucles de régulation existantes. L'influence de la régulation sur le processus peut être améliorée en réglant chaque appareil individuellement ou en effectuant la «mise au point» des réglages pour optimiser le fonctionnement des boucles de régulation existantes.
12. L'*Optimisation des boucles* de régulation constitue une rubrique distincte pour empêcher de conclure qu'un système est adéquat pour la seule raison qu'il fonctionne d'une certaine façon depuis plusieurs années. Il faut chercher à optimiser le fonctionnement normale et à définir des stratégies efficaces pour réduire les pannes au minimum.
13. La *Formation des opérateurs* peut être nécessaire pour obtenir les meilleurs résultats d'un processus, y compris des systèmes de régulation automatique.
14. L'*Assistance de tiers* peut être la clé d'une meilleure régulation. Il peut s'agir de consultation de personnes au sein de l'entreprise, d'autres entreprises exploitant des systèmes analogues et des fournisseurs d'appareillages. La connaissance des initiatives des concurrents peut être cruciale pour la survie de l'entreprise.

L'objectif de toutes les activités énumérées ci-dessus est d'identifier les initiatives qui amélioreront l'exploitation des installations. Les objectifs les plus courants sont les suivants:

- améliorer la qualité du produit
- augmenter la quantité du produit
- consommer moins d'énergie
- réduire les coûts de main-d'oeuvre
- consommer moins de matières premières
- prolonger la durée de vie des équipements
- s'adapter aux besoins changeants du marché.

Liste de contrôle 16-1
sur la régulation automatique

Installation _____ Date _____
Endroit _____ Par _____
Processus _____ Page _____ de _____

Légende des symboles d'évaluation

ok — Satisfaisant
? — sans réponse
x — insatisfaisant
G — grande
M — moyenne
F — faible
O — oui
N — non
E — étalonnage nécessaire
MP — mise au point nécessaire

Nom de la boucle du processus	1. Rendement du processus (ok, ?, x)	2. Sécurité (ok, ?, x)	3. Consommation énergétique (G, M, F)	4. Capacité du processus (ok, ?, x)	5. Etat/durée de vie du processus (ok, ?, x) / année	6. Qualité du processus (ok, ?, x)	7. Nombre de perturbations (O, N)	8. Elimination des perturbations (O, N)	9. Modifications du processus (ok, ?, x)	10. Boucles de régulation existantes (E, MP)	11. Suivi de l'appareillage (O, N)	12. Optimisation des boucles (ok, ?, x)	13. Formation des opérateurs	14. Assistance de tiers	Observations (démarches, coûts, possibilités d'écomomies en $, confirmations)